

NACHHALTIGE STROMVERSORGUNG DER ZUKUNFT

Kosten und Nutzen einer Transformation
hin zu 100% erneuerbaren Energien

Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt
Pressestelle
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau

E-Mail: pressestelle@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Autoren: Andreas Burger
Benjamin Lünenbürger
Dirk Osiek

Stand: August 2012

Gestaltung: UBA

Titelfoto: © designritter / photocase.com

INHALT

Zusammenfassung		4
1	EINLEITUNG	6
1.1	Ein grundlegender Umbau der Stromversorgung ist erforderlich	6
1.2	Ökonomische Wirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland	6
2	IST EIN AUSBAU DER ERNEUERBAREN STROMVERSORGUNG IN RICHTUNG 100 PROZENT MÖGLICH?	8
2.1	Technische Ausbaupotentiale erneuerbarer Energien weltweit	8
2.2	Ausbauszenarien für erneuerbare Energien bei der Stromerzeugung	9
2.3	Netzstabilität und Versorgungssicherheit	12
3	KOSTEN DES AUSBAUS ERNEUERBARER ENERGIEN BEI DER STROMERZEUGUNG IN RICHTUNG 100 PROZENT	14
3.1	Investitionskosten	15
3.2	Stromgestehungskosten	17
3.3	Differenzkosten	19
3.4	Wettbewerbsverzerrungen durch externe Umweltkosten und umweltschädliche Subventionen	21
4	GESAMTWIRTSCHAFTLICHE WIRKUNGEN DES AUSBAUS ERNEUERBARER ENERGIEN IN DER STROMERZEUGUNG	21
4.1	Investitionsimpulse und Wachstumswirkungen	21
4.2	Beschäftigungswirkungen	24
4.3	Vermiedene gesellschaftliche Folgekosten durch den Ausbau erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung	26
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND PERSPEKTIVEN	27
5.1	Erneuerbare Energien - der Schlüssel für eine nachhaltige Stromversorgung	27
5.2	Wirkungen auf Wettbewerbsfähigkeit, Beschäftigung und wirtschaftliche Entwicklung	28
5.3	Ansätze für einen beschleunigten und kostengünstigen Ausbau der erneuerbaren Energien	29
5.4	Fazit	30
6	LITERATURVERZEICHNIS	31

Zusammenfassung

Eine nachhaltige Stromversorgung erfordert den Übergang zu einer Vollversorgung mit erneuerbaren Energien.

- Wesentliche Kriterien einer nachhaltigen Stromversorgung sind ihre Gesundheits-, Umwelt- und Naturverträglichkeit sowie ihre Risikoarmut. Die gegenwärtige Stromerzeugung verletzt diese Kriterien. Weltweit verursacht die Stromerzeugung rund 26 Prozent der Treibhausgasemissionen.¹ Sie ist damit ein Hauptverursacher des Klimawandels. Die Atomenergienutzung geht mit hohen Risiken und Folgekosten durch Störfälle und die Entsorgung der radioaktiven Abfälle einher.
- Zur Einhaltung des 2-Grad-Ziels müssen die Industrieländer ihre Emissionen bis 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 verringern. Da für die Landwirtschaft und einzelne Industrieprozesse auch bei größten Klimaschutzanstrengungen eine Restgröße an Sockelemissionen verbleibt, müssen die Treibhausgasemissionen aus der Stromversorgung langfristig auf nahezu Null gesenkt werden. Eine nachhaltige Stromversorgung erfordert deshalb den Übergang zu einer Vollversorgung mit erneuerbaren Energien.

Eine Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien ist bis 2050 technisch möglich. Dabei spielt Strom aus Wind- und Sonnenenergie in allen ambitionierten Ausbauszenarien die zentrale Rolle.

- Die technischen Potentiale für eine globale Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien sind weltweit vorhanden.
- Die Auswertung ambitionierter langfristiger Ausbauszenarien bis 2050 für Deutschland, die Europäische Union und die ganze Welt zeigt, dass Strom aus Sonnen- und Windenergie in allen Studien den Erzeugungsmix dominiert.
- Parallel zum Ausbau der erneuerbaren Energien ist ihre Integration in das Stromversorgungssystem erforderlich. Hier leisten der Ausbau der Netze, Lastmanagement und Speicher unverzichtbare Beiträge.
- Studien zeigen, dass bis 2050 eine vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromerzeugung jederzeit eine sichere Stromversorgung garantieren kann.

Die Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sind bereits stark gesunken – diese Entwicklung wird sich fortsetzen. Da die konventionelle Stromerzeugung künftig teurer wird, lohnen sich erneuerbare Energien immer mehr.

- Die Kosten für eine Megawattstunde (MWh) Strom aus Photovoltaik- und Onshore- Windenergieanlagen sind in den letzten zwei Jahren stark gesunken, für Photovoltaik um rund 44 Prozent, bei der Onshore-Windenergie um rund 7 Prozent. Im gleichen Zeitraum stiegen die Kosten pro MWh Strom durch Kohlekraftwerke um 9 Prozent.
- Die absehbare Verknappung fossiler Brennstoffe wird zu weiteren Preissteigerungen führen. Dies ist ein zusätzlicher Grund, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren und vorausschauend die Weichen für erneuerbare Energien in der Stromversorgung zu stellen.
- Eine vergleichende Analyse zahlreicher Studien zum Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland, der EU und in der ganzen Welt zeigt, dass die Kosten erneuerbarer Energien durch Lernkurveneffekte weiter sinken werden. Bis zum Jahr 2050 werden sich die Investitionskosten bei Photovoltaik um 75 Prozent und bei Offshore-Windenergieanlagen um 50 Prozent verringern.
- In 2030 werden die durchschnittlichen Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien in Deutschland voraussichtlich rund 7,6 ct/kWh betragen. Strom aus neuen Erdgas- und Kohlekraftwerken schlagen dann voraussichtlich mit über 9 ct/kWh zu Buche. Nicht berücksichtigt sind hierbei Kosten der Systemintegration.
- In vielen Gebieten in Afrika, Indien, Südostasien und Teilen des Mittleren Ostens ist schon heute der Betrieb von Photovoltaikanlagen wirtschaftlich im Vergleich zu einer Versorgung durch Dieselgeneratoren.

¹ Wheeler und Ummel (2008).

Umweltschädliche Subventionen und die mangelnde Berücksichtigung gesellschaftlicher Folgekosten durch die fossile Stromerzeugung und Atomkraft verzerren massiv den Wettbewerb zu Lasten der erneuerbaren Energien.

- Die Umweltkosten der Stromerzeugung aus Braunkohle sind in Deutschland mit rund 11 ct/kWh höher als die Stromgestehungskosten aus Onshore-Windenergieanlagen mit rund 7,5 ct/kWh.
- Weltweit beliefen sich Subventionen für fossile Energieträger auf 409 Milliarden Dollar in 2010, davon entfallen 122 Milliarden Dollar auf die Stromversorgung. Die finanziellen Förderungen bei der Markteinführung erneuerbarer Energien betragen dagegen in 2010 weltweit lediglich 44 Milliarden Dollar.

Der Umbau des Energiesystems lohnt sich gesamtwirtschaftlich. Die Förderung erneuerbarer Energien vermeidet gesellschaftliche Folgekosten durch Umwelt- und Gesundheitsschäden, schafft Arbeitsplätze und steigert die regionale Wertschöpfung. Außerdem verbessert sie die Wettbewerbsfähigkeit auf den dynamisch wachsenden Weltmärkten für Techniken erneuerbarer Energien.

- Die Kosten eines ungebremsen Klimawandels könnten 2050 bis zu 14 Prozent des weltweiten Konsums betragen, mit weiter steigender Tendenz. Dagegen betragen die Kosten einer umfassenden Begrenzung der Treibhausgasemissionen schätzungsweise nur rund ein Prozent.
- Die Erfahrungen in Deutschland mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien sind positiv. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Strombereitstellung verdreifachte sich in den letzten 10 Jahren auf rund 20 Prozent im Jahr 2011. Zwischen 2004 und 2011 hat sich die Zahl der Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien von 160.000 auf rund 382.000 mehr als verdoppelt. Netto entstanden im Jahr 2009 etwa 70.000 bis 90.000 Arbeitsplätze.
- Weltweit arbeiten bereits 5 Millionen Beschäftigte im Bereich erneuerbarer Energien – Tendenz weiter steigend. Schätzungen zufolge wird der in Europa angestrebte Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2020 zu leicht positiven Wachstumseffekten führen und unterm Strich 400.000 neue Arbeitsplätze schaffen.
- Bis 2025 soll der Weltmarkt für umweltfreundliche Energien weltweit um 747 Milliarden Euro wachsen. Erneuerbare Energien spielen dabei eine zentrale Rolle. Sie sind Schlüsseltechnologien für die Energieversorgung der Zukunft und daher ökonomisch sehr relevant. Länder, die den Ausbau der erneuerbaren Energien vorantreiben, haben Wettbewerbsvorteile auf diesen Märkten.

Die Vollversorgung mit erneuerbaren Energien in der Stromversorgung ist eine Generationenaufgabe und ein globales Innovationsprojekt. Forschung und Entwicklung, Innovationsförderung und Instrumente zur Förderung der Marktdiffusion sind wichtig, um den Ausbau und die Kostensenkung bei den erneuerbaren Energien zu beschleunigen.

- Je stärker die Märkte für erneuerbare Energien wachsen, umso größer sind die Kostensenkungen durch Lerneffekte. Weil alle Länder davon profitieren, ist die Förderung der erneuerbaren Energien eine globale Aufgabe. Deshalb muss ihr Ausbau überall rasch voran getrieben werden.
- Von zentraler Bedeutung für den Ausbau der erneuerbaren Energien sind marktbasierende Fördermechanismen. Einspeisevergütungen für erneuerbare Energien schaffen Planungssicherheit für Investoren, verringern das Investitionsrisiko und damit die Finanzierungskosten und beschleunigen über Learning-by-Doing sowie Skaleneffekte die Marktdiffusion der erneuerbaren Energien.
- Wettbewerbsverzerrungen zu Lasten der erneuerbaren Energien sind abzubauen. Dies erfordert den Abbau klimaschädlicher Subventionen und die Internalisierung externer Kosten in der Stromerzeugung.

1 EINLEITUNG

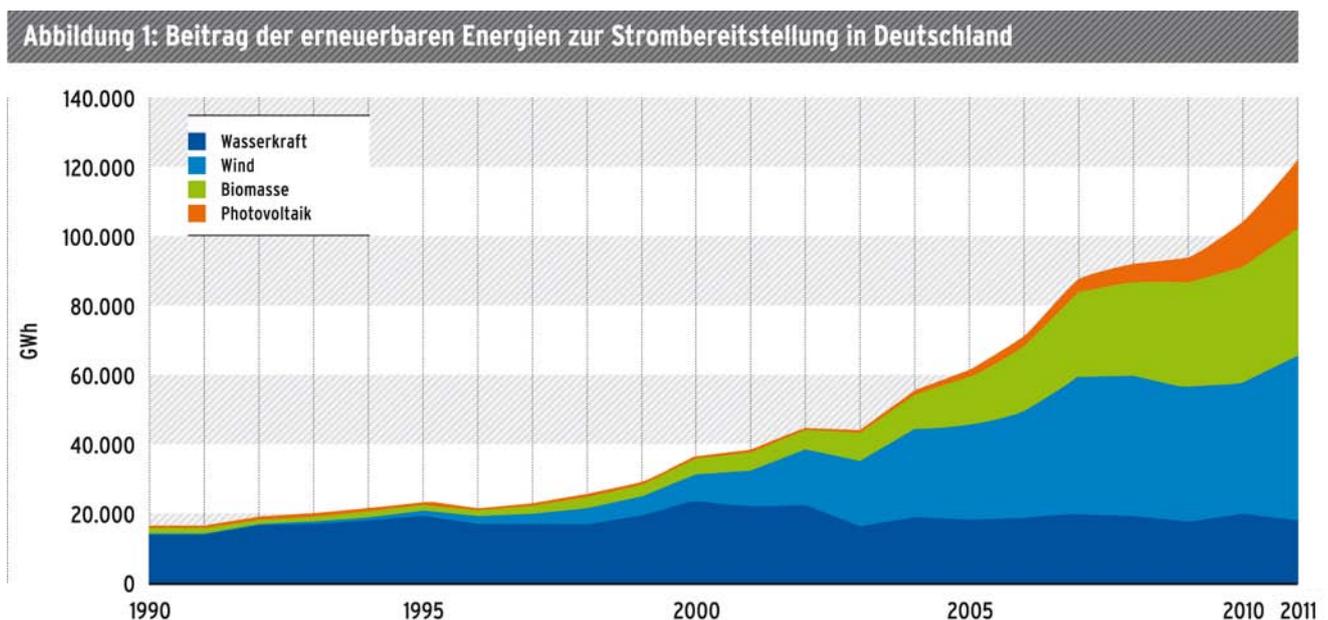
1.1 Ein grundlegender Umbau der Stromversorgung ist erforderlich

Die heutige, weitgehend auf fossilen Energien und Atomkraft beruhende Stromerzeugung ist unvereinbar mit einer nachhaltigen Entwicklung. Weltweit verursacht die Stromerzeugung rund 26 Prozent der Treibhausgasemissionen.² Sie ist damit ein Hauptverursacher des Klimawandels. Ohne massiven Ausbau der erneuerbaren Energien wird das 2-Grad-Ziel zur Begrenzung der Erderwärmung nicht erreichbar sein. Hohe soziale und ökonomische Folgekosten, etwa durch steigende Meeresspiegel und anhaltende Dürren, wären in vielen sensiblen Regionen der Welt Konsequenz eines ungebremsen Klimawandels. Katastrophen wie 2011 in Fukushima und 1986 in Tschernobyl zeigen, dass auch von der Atomkraft große Risiken und Folgekosten ausgehen – für die heutige Generation und unumkehrbar für alle zukünftigen. Hinzu kommen hohe Umweltbelastungen bei der Gewinnung von Uran und fossilen Brennstoffen. Der Umstieg zu einer auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung ist deshalb dringend notwendig.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien zahlt sich nicht nur wegen vermiedener ökologischer Risiken und Folgekosten aus. Die Kosten der Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien sind in den letzten Jahren stark gesunken – schon heute sind sie teilweise wettbewerbsfähig. In Zukunft werden die Rohstoffpreise für fossile Energien und Uran voraussichtlich weiter steigen und starken Schwankungen unterworfen sein, während die Kosten der erneuerbaren Energien sinken. Daher wird die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in absehbarer Zeit kostengünstiger sein. Für den Ausbau der erneuerbaren Energien sprechen auch industriepolitische Gründe. Die Weltmärkte für Techniken erneuerbarer Energien boomen und es ist bereits ein Wettlauf um die führende Position auf diesen Märkten entbrannt. Länder, die frühzeitig erneuerbare Energien fördern, sind hier in einer vorteilhaften Position.

1.2 Ökonomische Wirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland

Nach der Nuklearkatastrophe von Fukushima beschloss Deutschland den Ausstieg aus der Atomenergie – noch im Jahr 2011 wurden acht Atomkraftwerke stillgelegt. Dies wäre ohne den raschen Ausbau der erneuerbaren Energien in den Jahren zuvor nicht möglich gewesen. Mit einem Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von rund 20 Prozent im Jahr 2011 ist Deutschland bereits auf dem Weg zu einer treibhausneutralen Energieversorgung (siehe Abbildung 1).

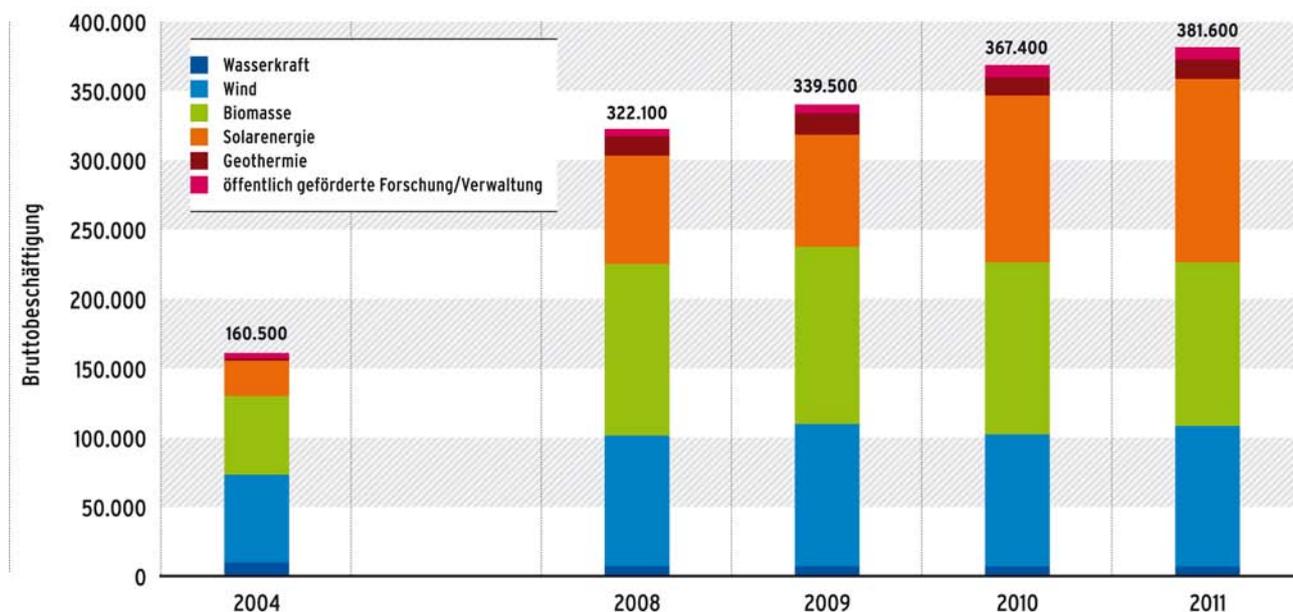


Quelle: BMU (2012a), Folie 13

2 Wheeler und Ummel (2008).

Der rasante Ausbau der erneuerbaren Energien spiegelt sich auch in der Beschäftigung wider. Zwischen 2004 und 2011 hat sich die Zahl der Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien von 160.000 auf rund 382.000 mehr als verdoppelt.³ Selbst während der Finanzkrise 2009 gab es einen leichten Anstieg der Beschäftigung (vgl. Abbildung 2). Modellrechnungen zeigen, dass erneuerbare Energien auch unterm Strich – d.h. unter Berücksichtigung parallel entstehender Beschäftigungsverluste z.B. bei der fossilen Stromerzeugung – positive Beschäftigungswirkungen haben. Im Jahr 2009 belief sich der Beschäftigungszuwachs durch den Ausbau erneuerbarer Energien netto auf etwa 70.000 bis 90.000 Arbeitsplätze.⁴

Abbildung 2: Beschäftigungseffekte des Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland



Quelle: BMU (2012) S. 5, 8 und Breitschopf u.a. (2011) S. 16.

Die Nutzung erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung sparte im Jahr 2011 zudem Importe fossiler Energieträger im Wert von 2,9 Milliarden Euro ein. Zugleich wurden Umweltkosten (durch Klimagas und Luftschadstoffe) von rund 8 Milliarden Euro vermieden.⁵ Darüber hinaus trug die Förderung erneuerbarer Energien wesentlich dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen bei den erneuerbaren Energien zu stärken. Sie sind auf dem Weltmarkt für erneuerbare Energien hervorragend vertreten. Dies belegen z. B. die hohen Weltmarkt- und Patentanteile deutscher Unternehmen und die starken Steigerungen des Exports erneuerbarer Energien in den letzten Jahren.⁶

In den nächsten Jahrzehnten soll der Ausbau der erneuerbaren Energien weitergehen. Spätestens 2050 soll in Deutschland mindestens 80 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Energien stammen. Dies ist Teil der Energiewende – einer umfassenden Klimaschutzstrategie mit dem Ziel, die deutschen Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 zu senken. Die Energiewende ist eine große Herausforderung und Gegenstand lebhafter Diskussionen. Nach Umfrageergebnissen stimmen rund 90 Prozent der Bevölkerung einem konsequenten Umstieg auf erneuerbare Energien zu.⁷ Allerdings gibt es in Teilen der Bevölkerung und der Wirtschaft auch skeptische Stimmen, vor allem bezüglich der technischen Machbarkeit, der Versorgungssicherheit und der Kosten eines starken Ausbaus der erneuerbaren Energien.

3 BMU (2012), S. 8.

4 Lehr u.a. (2011), S. 214.

5 Breitschopf (2012a).

6 BMU/UBA (2011).

7 BDEW (2012).

Das folgende Kapitel analysiert deshalb zunächst, ob ein Ausbau der erneuerbaren Energien in Richtung Vollversorgung möglich ist. Kapitel 3 und 4 gehen anschließend der Frage nach, welche Kosten und Nutzen dabei entstehen. Eine wesentliche Grundlage bildet dabei die im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellte Meta-Studie des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) zu den Kosten des Ausbaus erneuerbaren Energien.⁸ Diese analysiert die wichtigsten vorliegenden Szenarien zur langfristigen Transformation des Energiesystems, bei denen bis 2050 mindestens 80 Prozent des Stromverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Die Auswahl umfasst nicht nur Szenarien für Deutschland, sondern auch für Europa und die ganze Welt.⁹

2 IST EIN AUSBAU DER ERNEUERBAREN STROMVERSORGUNG IN RICHTUNG 100 PROZENT MÖGLICH?

Eine Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien erfordert erstens ausreichend hohe technische Potentiale.¹⁰ Kapitel 2.1 geht dieser Frage nach und beschreibt, welche technischen Ausbaupotentiale in Relation zum Energiebedarf weltweit bestehen. Zweitens ist zu klären, welchen Beitrag die verschiedenen Techniken der erneuerbaren Energien sinnvoll leisten können. Ergebnisse der hierzu entwickelten Szenarien für die globale, europäische und nationale Ebene fasst Kapitel 2.2 zusammen. Drittens stellt sich die Frage, wie Netzstabilität und Versorgungssicherheit bei einem Ausbau der erneuerbaren Energien gesichert werden können. Dies ist Gegenstand von Kapitel 2.3, wobei sich die Ausführungen auf Deutschland beschränken.

2.1 Technische Ausbaupotentiale erneuerbarer Energien weltweit

Analysen des Weltklimarates für das Jahr 2050 zeigen, dass die technischen Potentiale in allen Weltregionen ausreichen, um die Energieversorgung vollständig durch erneuerbare Energien zu decken (vgl. Abbildung 3).¹¹ Dabei liegt das technische Potential in der Regel sogar um ein Vielfaches höher als der Energiebedarf. So übersteigt z.B. in den USA oder in Indien das technische Leistungsvermögen der erneuerbaren Energien 2050 den Primärenergieverbrauch von 2007 um das 7,6 bis 10-fache, in Südamerika oder Afrika sogar um das 25 bis über 50-fache. In den Ländern auf der Südhalbkugel hat die Solarenergie eine überragende Bedeutung, sogar in einigen nördlichen Ländern weist sie das größte technische Potential auf. Dort spielen allerdings auch andere erneuerbare Energien wie Windenergie und Wasserkraft eine wichtige Rolle.

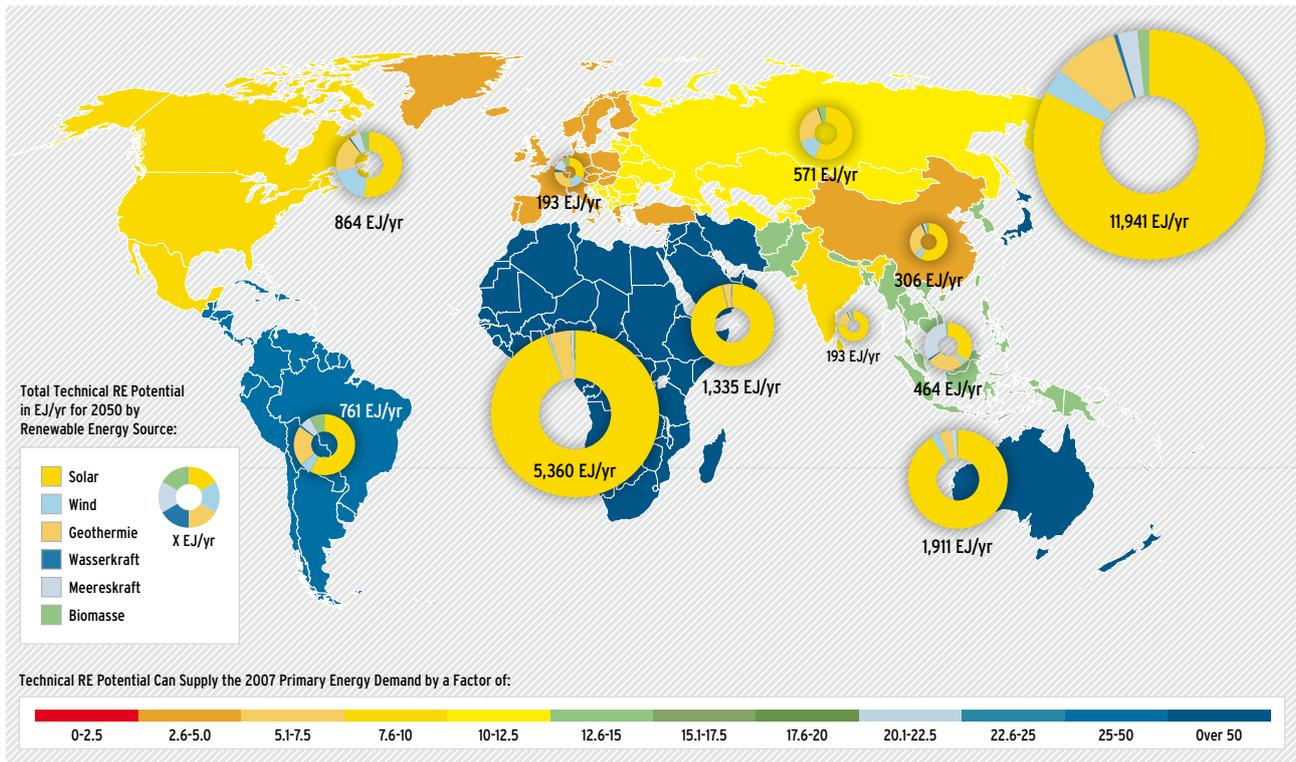
8 PIK (2012).

9 Analysiert wurden: Leitstudie (2010), SRU (2011), WWF (2009), Greenpeace(2009), EWI/GWS/Prognos(2010), WI/PIK(2010), EC(2011), ECF (2010), EREC (2010), PWC/PIK/IIASA/ECF (2010), EWI/Energynautics (2011), PIK/IIRM/IfE (2011), Greenpeace(2010), WWF(2011), IEA (2010a), Energy Watch Group (2008).

10 Das technische Potential umfasst jenen Teil des gesamten, theoretisch möglichen Potenzials der erneuerbaren Energien, der technisch nutzbar gemacht werden kann. Meist wird das Verhältnis der beiden mit dem Wirkungsgrad angegeben. So ist z.B. das technische Potential einer Photovoltaik Anlage mit 20 Prozent Wirkungsgrad ein Fünftel des solaren theoretischen Potentials. Das technische Potential kann durch ökologische Restriktionen (z.B. Flächenbeanspruchung, Beeinträchtigung von Fließgewässern, negative Veränderung des Landschaftsbildes) geschmälert werden. Ebenso können z.B. Nutzungseinschränkungen infolge der Ortsgebundenheit bei der Geothermie das technische Potential einschränken.

11 IPCC (2012). Die Angaben beziehen sich auf den gesamten Energiebedarf (einschließlich Wärme und Verkehr).

Abbildung 3: Technische Potentiale 2050 verglichen mit dem Primärenergieverbrauch 2007

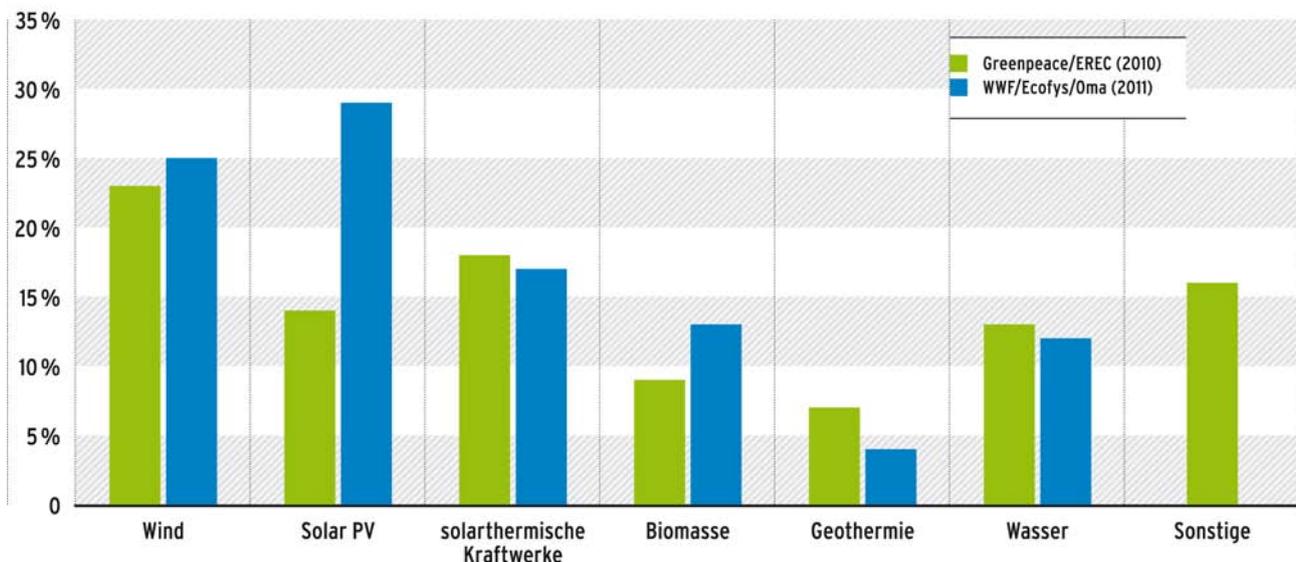


Quelle: IPCC (2012), Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Abbildung 10.19 (oberer Teil). Cambridge University Press.

2.2 Ausbauszenarien für erneuerbare Energien bei der Stromerzeugung

Die globalen technischen Potentiale spiegeln sich auch in den Ergebnissen globaler Energieszenarien wider. In den analysierten Studien mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien bis 2050 dominiert die Solarenergie (Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke) den globalen Energiemix im Jahr 2050 deutlich vor der Windenergie (siehe Abbildung 4).¹² Zusammen kommen Wind- und Solarenergie auf 55 bis über 70 Prozent am globalen Strommix.

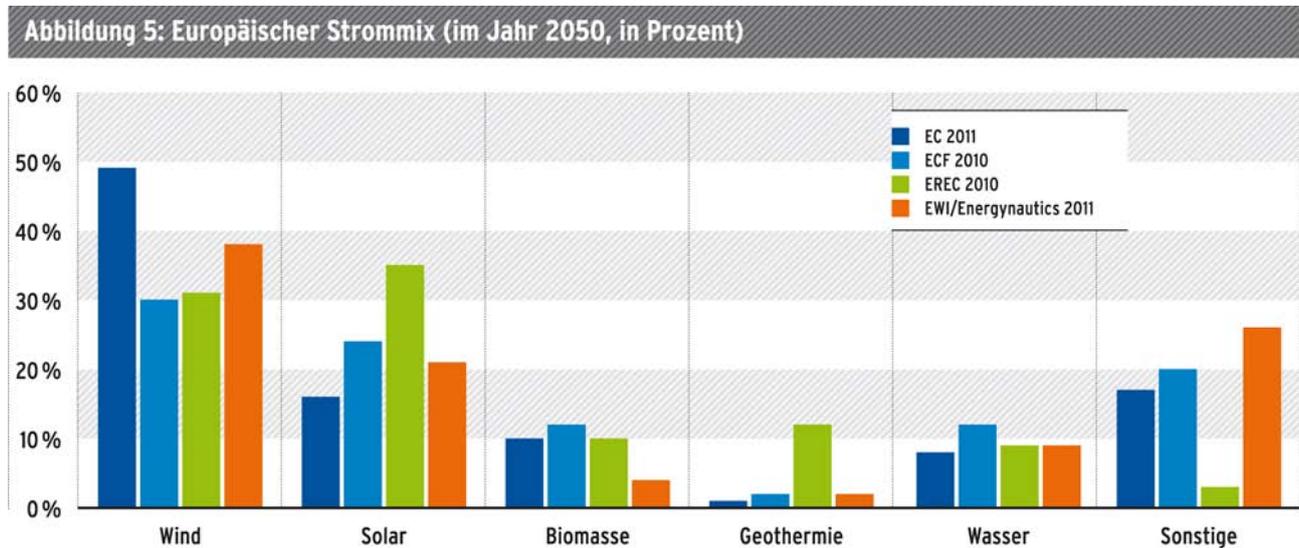
Abbildung 4: Strommix in globalen Studien (im Jahr 2050, in Prozent)



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus PIK (2012), S. 15

¹² In Greenpeace/EREC (2010) wird Onshore-Windenergie und Offshore-Windenergie nicht separat ausgewiesen. Die grafischen Ergebnisse für Windenergie werden daher in aggregierter Form dargestellt. Die Stromerzeugung aus fossilen und nuklearen Brennstoffen ist unter Sonstige zusammengefasst.

Die Studien mit Fokus auf Europa zeigen, dass dort die Windenergie voraussichtlich die größte Bedeutung für den zukünftigen Strommix haben wird (vgl. Abbildung 5). Ihr Anteil am europäischen Strommix beträgt nach den Ergebnissen der Studien im Jahr 2050 zwischen 30 und 49 Prozent und übertrifft damit in fast allen Studien den Beitrag der Solarenergie an der Stromerzeugung, deren Anteil zwischen 16 und 35 Prozent liegt.¹³ Biomasse und Wasserkraft liegen mit höchstens jeweils etwa 10 Prozent deutlich dahinter. Insofern zeichnen die Studien ein relativ einheitliches Bild. Teilweise sind die Streubreiten allerdings groß, vor allem bei der Geothermie, die noch am Beginn ihrer Entwicklung steht. Die Streuung der Biomasseanteile erklärt sich durch in den Studien unterschiedlichen angenommenen Ausbauschranken.¹⁴



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus PIK (2012), S. 15

Für Deutschland gibt es zahlreiche Studien, die einen weitgehenden Umstieg der Stromversorgung auf erneuerbaren Energien durch Szenarienanalysen abbilden. Die im Auftrag des Bundesumweltministeriums erstellten Langfristszenarien analysieren, wie die von der Bundesregierung beschlossenen Ausbauziele der erneuerbaren Energien bis 2050 erreichbar sind.¹⁵ Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Ergebnisse eines der drei Langfristszenarien (Szenario 2011 A). Dabei steigt der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bis 2020 auf ca. 41 Prozent und bis 2050 auf ca. 85 Prozent. Im Mittel wächst die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien bis 2020 um jährlich 8,2 Prozent.

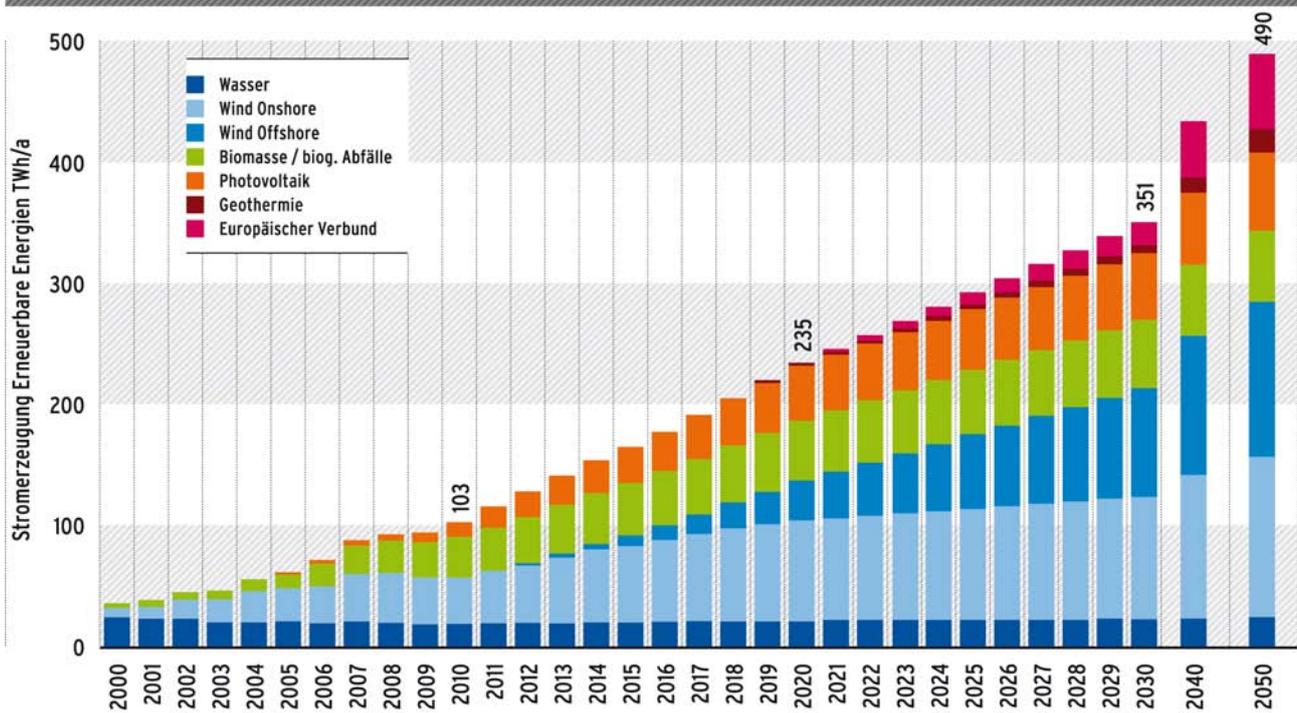
Den größten absoluten Beitrag leistet dabei die Windenergie. Sie wächst mit durchschnittlich 11 Prozent pro Jahr sehr stark, nur das Wachstum der Photovoltaik ist bis 2020 mit jährlich 13,5 Prozent dynamischer. Zwischen 2020 und 2050 nimmt die Strombereitstellung der erneuerbaren Energien im Mittel um jährlich 2,5 Prozent zu. Eine zentrale Rolle spielt hierbei der Ausbau der Offshore-Windenergie. Importe aus dem europäischen Stromverbund gewinnen in dem Szenario ebenfalls an Bedeutung. Wegen der hohen installierten Leistung von Photovoltaik wird nach 2030 eher das Wachstum des europäischen Stromverbunds und der weniger volatilen Offshore-Windenergie gestärkt. Das Wachstum der Photovoltaik schwächt sich dagegen ab.

¹³ In den Studien EC (2011) und EREC (2010) werden Onshore-Windenergie und Offshore-Windenergie nicht separat ausgewiesen. In EC (2011) werden außerdem Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke nicht separat ausgewiesen. Die grafischen Ergebnisse für Windenergie und Solarenergie sind daher in aggregierter Form dargestellt.

¹⁴ Zu den Ausbauschranken zählen beispielsweise begrenzt verfügbare Flächen und Nutzungskonkurrenzen zwischen der energetischen Nutzung von Biomasse und anderen Nutzungsformen (Lebens- und Futtermittel, stoffliche Nutzung).

¹⁵ DLR/IWES/IFNE (2011). Die Ausbauziele der Bundesregierung nach EEG § 1 (2) betragen mindestens 35 Prozent erneuerbare Energien an der Bruttostromversorgung bis spätestens 2020 und mindestens 80 Prozent bis spätestens 2050.

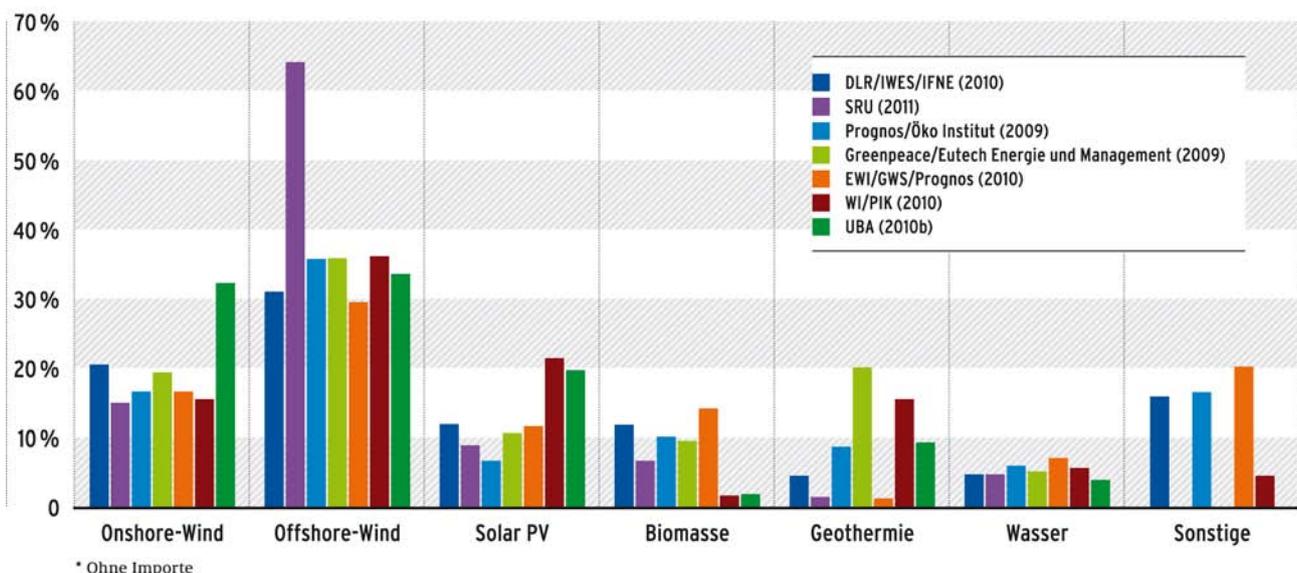
Abbildung 6: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Szenario 2011 A nach erneuerbaren Energieträgern



Quelle: DLR/IWES/IFNE (2011), Szenario 2011 A

Auch in den anderen untersuchten Studien zum Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland dominiert im Jahr 2050 die Windenergie, mit Anteilen von 45 bis 78 Prozent den Strommix (vgl. Abbildung 7).¹⁶ Auffällig ist der hohe Anteil der Offshore-Windenergie an der Stromerzeugung. Insgesamt entfällt in Deutschland auf die Windenergie ein deutlich höherer Anteil am Strommix als in den EU-Ausbauszenarien. Windenergie zusammen mit Photovoltaik¹⁷ als dargebotsabhängige Erzeugungsformen haben in allen Studien einen Anteil von mindestens 57 Prozent an der Stromversorgung.

Abbildung 7: Deutscher Strommix (im Jahr 2050, in Prozent)*



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus PIK (2012), S.15 und UBA (2010b)

¹⁶ Vgl. DLR/IWES/IFNE (2010), SRU (2011), Prognos/Öko Institut (2009), Greenpeace/ Eutech Energie und Management (2009), EWI/GWS/Prognos (2010), WI/PIK (2010), UBA (2010b).

¹⁷ In Deutschland spielen über alle Ausbauszenarien hinweg solarthermische Kraftwerke keine Rolle.

Kasten 1: 100 Prozent Erneuerbare Energien Regionen in Deutschland

Die Vision einer ausschließlich auf erneuerbaren Energien beruhenden Energieversorgung ist in Deutschland für eine wachsende Zahl von Kommunen und Regionen attraktiv. Mittlerweile gibt es über einhundert Landkreise, Gemeinden und Regionalverbände, die ihre Energieversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umstellen wollen. Das Bundesumweltministerium fördert die Vernetzung der Kommunen und Regionen, die ihre Energieversorgung auf erneuerbare Energien umstellen wollen mit dem Projekt „100 Prozent-Erneuerbare-Energien-Regionen“ (www.100-ee.de). In diesen Regionen leben bereits rund 22 Prozent der deutschen Bevölkerung.

Wesentliche Motive für diese lokalen und regionalen Initiativen sind das Engagement der Bürgerinnen und Bürger für den Klimaschutz und die Tatsache, dass der Umstieg auf erneuerbare Energien unabhängig macht von den begrenzten fossilen Ressourcen. Hinzu kommt die Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz. Außerdem führt eine dezentrale, auf erneuerbaren Energien basierende Energieerzeugung zu höherer regionaler Wertschöpfung. Dies schafft vor Ort zusätzliche Arbeitsplätze und erhöht die Steuereinnahmen der Kommunen.

2.3 Netzstabilität und Versorgungssicherheit

Netzstabilität und Versorgungssicherheit sind zentrale Anforderungen beim weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien. Für eine sichere Stromversorgung müssen Angebot und Nachfrage ständig ausgeglichen sein. Da hohe Anteile dargebotsabhängiger Energien das angebotsseitige Potential zur Anpassung an die Nachfrage mindern, erfordert der Ausbau der erneuerbaren Energien eine höhere Systemflexibilität im übrigen Stromversorgungssystem. Eine große Bedeutung hat dabei das Stromnetz: Je besser es ausgebaut ist, umso großräumiger kann der Ausgleich von Angebot und Nachfrage erfolgen.

Weitere Ansatzpunkte zur Erhöhung der Systemflexibilität sind das Lastmanagement und die Speicherung von Strom. Lastmanagement ermöglicht es, durch zeitliche Verlagerung oder das Abschalten unkritischer Stromanwendungen Lastspitzen in Situationen zu minimieren, in denen die Last die Einspeisung aus erneuerbaren Energien deutlich übersteigt und den Verbrauch auf Situationen zu verlagern, in denen die Einspeisung aus erneuerbaren Energien die Last übersteigt.¹⁸ Zusätzliche Stromspeicher sind bei steigenden Anteilen von Wind- und Solarenergie mittel- bis langfristig in größerem Umfang erforderlich. Es werden sowohl Kurzzeitspeicher als auch Langzeitspeicher benötigt.

Differenzierte Studien zum notwendigen Aus- und Umbau des Stromnetzes für den Ausbau der erneuerbaren Energien sind wegen der hohen Komplexität nur auf nationaler Ebene möglich. Daher gehen die folgenden Ausführungen exemplarisch auf die Situation in Deutschland ein. Das deutsche Netz ist bisher nicht für den Transport großer Leistungen über weite Entfernungen ausgelegt. Die Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland sind gesetzlich verpflichtet, in einem jährlichen Netzentwicklungsplan den Optimierungs-, Verstärkungs- und Ausbaubedarf der Übertragungsnetze für einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb zu bestimmen.¹⁹ Ausgehend vom Bestandsnetz mit rund 35.000 km Höchstspannungsleitungen berechneten sie für 2012, dass bis 2022 je nach Szenario zwischen 4.200 und 4.500 km der bestehenden Leitungen optimiert oder verstärkt und zwischen 3.500 km und 4.100 km neue Trassen gebaut werden müssen.²⁰ Dabei sind unter anderem vier große „Stromautobahnen“ von Nord- nach Süddeutschland geplant. Zur Gewährleistung eines verlustarmen Transports soll für diese langen Strecken die HGÜ-Technik (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) auf 1800 bis 2400 km eingesetzt werden. Dieser Ausbaubedarf entsteht vor allem wegen des Ausbaus der Windenergie im Norden und Osten Deutschlands, jedoch auch aufgrund des zunehmenden europäischen Stromhandels.

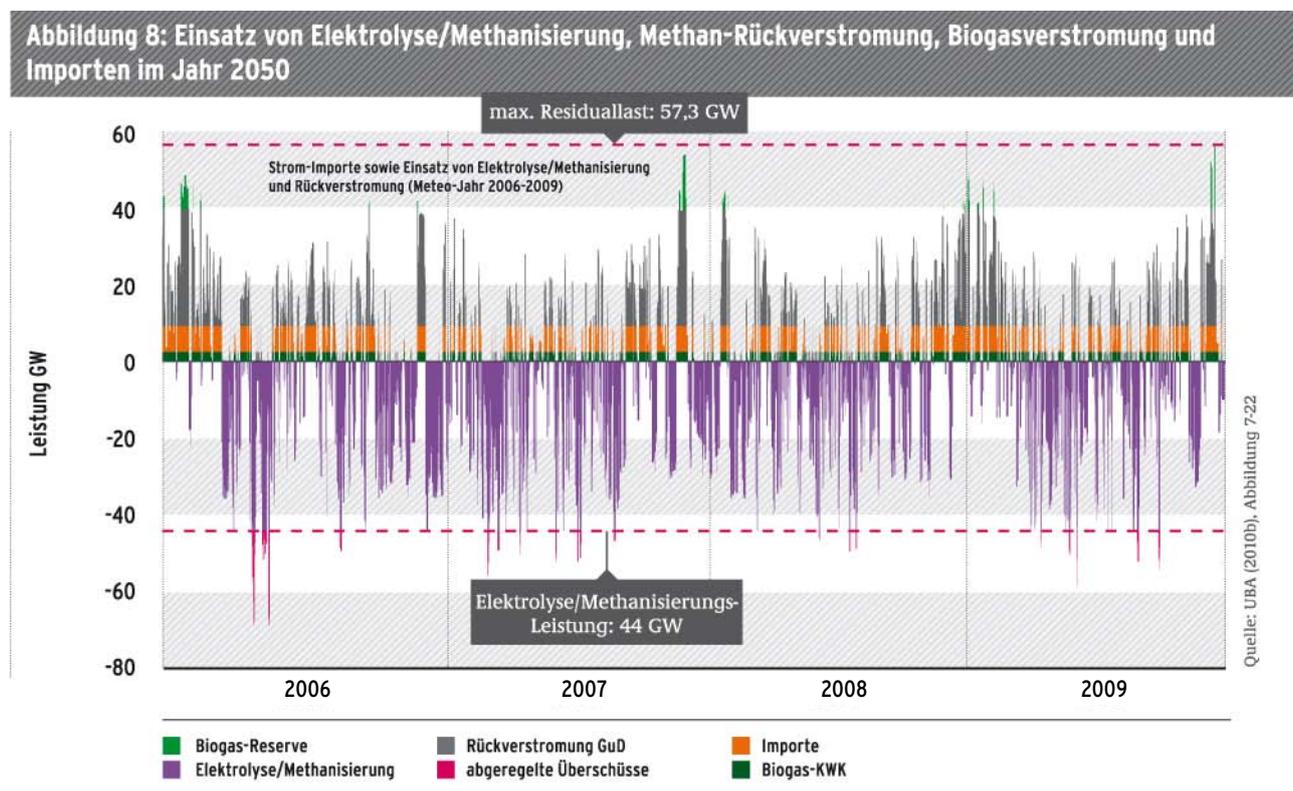
18 UBA (2010b), S. 41ff.

19 ÜNB (2012).

20 Die Zahlen umfassen auch die bereits im Energieleitungsausbaugesetz festgeschriebenen Leitungen, in Umsetzung befindliche Maßnahmen sowie Maßnahmen mit genehmigten Investitionsbudgets.

Der Um- und Ausbau der Verteilernetze wird in diesen Szenarien nicht untersucht. Auch hier besteht Ausbaubedarf, da in einigen Regionen bereits heute nicht mehr zu jeder Zeit der Strom aus erneuerbaren Energien vollständig abgenommen und übertragen werden kann. Neben Netzengpässen können auch stark schwankende Lastflüsse oder wechselnde Lastflussrichtungen im Verteilungsnetz Anpassungen in der Infrastruktur notwendig machen. Der Stromfluss erfolgte bisher nur in eine Richtung – vom großen zentralen Erzeuger auf viele dezentrale Verbraucher.

Das Umweltbundesamt zeigt in seiner Studie, dass bei einer Vollversorgung der Stromversorgung mit erneuerbaren Energien im Jahr 2050 selbst unter restriktiven Annahmen die Versorgungssicherheit gewährleistet werden kann²¹ Denn in der Studie wird unterstellt, dass ein Ausgleich über das europäische Verbundnetz nur sehr begrenzt stattfindet. Auch große Speicherpotentiale, wie skandinavische oder alpine Speicherwasserkraftwerke, werden in dem Szenario nicht berücksichtigt.²² Zur Stromspeicherung werden für ein Langspeichersystem zwei Alternativen beschrieben. Bei beiden Langzeitspeichersystemen werden Überschüsse aus der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien zur Herstellung von Wasserstoff oder Methan verwendet. Das gewonnene Gas kann bei Deckungslücken rückverstromt werden.²³ Abbildung 8 zeigt das Simulationsergebnis für das Speichersystem auf Basis des erneuerbaren Energien-Methan stundengenau für vier Jahre mit der Wetter- und Lastcharakteristik der Beispieljahre 2006 bis 2009. Die Last wird in jeder Stunde vollständig gedeckt, die Fluktuation der erneuerbaren Energien kann zu jeder Zeit sicher ausgeglichen werden.²⁴ Ähnliche Ergebnisse wurden mit dem Langzeitspeichersystem erneuerbare Energien-Wasserstoff erzielt.



Quelle: UBA (2010b), Abbildung 7-22

21 UBA (2010b).

22 Der Sachverständigenrat für Umweltfragen bezog dagegen Speicherwasserkraftwerke in seinem Gutachten zur Vollversorgung mit erneuerbaren Energien bis 2050 mit ein, insbesondere die skandinavischen Potentiale. Vgl. SRU (2011), Kap. 4.5.

23 Für eine genaue Beschreibung dieser Systeme siehe UBA (2010b) Kapitel 4.1.

24 Dazu werden je nach Bedarf folgende steuerbare Erzeugungskapazitäten eingesetzt: 2,5 GW Biogas-Gasturbinen mit Kraft-Wärmekoppelung, 9,3 GW Stromimporte aus erneuerbaren Energien, 28 GW GuD-Kraftwerke zur Rückverstromung aus Methan und 17,5 GW Biogas-Gasturbinen als Reservekraftwerke. Auch bei gesteigerter Energieeffizienz und Berücksichtigung von Lastmanagement beträgt die residuale Spitzenlast des Stromversorgungssystems noch etwa 57 GW.

3 KOSTEN DES AUSBAUS ERNEUERBARER ENERGIEN BEI DER STROMERZEUGUNG IN RICHTUNG 100 PROZENT

Wichtigster Kostenfaktor bei vielen erneuerbaren Energien sind die technologiespezifischen **Investitionskosten**, die in Kapitel 3.1 näher analysiert werden. Sie umfassen z.B. bei einer Windenergieanlage die Kosten für die Anlage, das Fundament, die Netzanbindung, die Erschließung, den Transport, sowie Montage, Planung und Genehmigung. Aufbauend auf den Investitionskosten können die **Stromgestehungskosten** (LCOE) geschätzt werden, die einen Vergleich der Kosten zwischen den EE-Technologien ermöglichen (Kapitel 3.2). Notwendig sind dafür zusätzliche Annahmen, z.B. zu den standortabhängigen jährlichen Volllaststunden einer erneuerbaren Energien Technologie, Abschreibungszeiträumen und Diskontraten.

Um Aussagen zur Wirtschaftlichkeit erneuerbarer Energien im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung treffen zu können, ist eine Schätzung der sogenannten systemanalytischen **Differenzkosten** erforderlich (Kapitel 3.3). Dafür sind weitere Annahmen zu treffen, vor allem zur Preisentwicklung der fossilen Brennstoffe, den CO₂-Preisen und steuerlichen Belastungen. Außerdem sind die Kosten für Netzausbau und Systemintegration der erneuerbaren Energien (Lastmanagement, Stromspeicherkosten) zu berücksichtigen. Mit der zunehmenden Komplexität der Schätzungen steigt auch die Unsicherheit der Prognosen – die bei langfristigen Zukunftsszenarien ohnehin beträchtlich sind (siehe Abbildung 9).



Quelle: PIK (2012)

Die systemanalytischen Differenzkosten erfassen alle betriebswirtschaftlichen Kosten. Sie blenden jedoch die gesellschaftlichen Folgekosten der Energieerzeugung ebenso aus wie Wettbewerbsverzerrungen zu Lasten erneuerbarer Energien durch umweltschädliche Subventionen. Daher ist es erforderlich, auch diese Aspekte im Rahmen einer umfassenden Kostenanalyse zu berücksichtigen (Kapitel 3.4).

Die effiziente und sparsame Nutzung von Strom ist nicht Gegenstand dieses Hintergrundpapiers. Gleichwohl hat die Energieeffizienz eine große Bedeutung für die Kosten einer Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien und die Frage, wie eine gesamtwirtschaftlich optimale Stromversorgung gewährleistet werden kann (vgl. Kasten 2).

Kasten 2: Bedeutung der Energieeffizienz für die Kosten des Ausbaus der erneuerbaren Energien

Studien belegen, dass viele Maßnahmen zur Einsparung von Strom wirtschaftlich sind.²⁵ Dazu gehört zum Beispiel die Nutzung sparsamer Elektromotoren und Pumpen in der Industrie oder der Gebrauch stromsparender Haushaltsgeräte. Werden diese Effizienzpotentiale erschlossen, sinken die Kosten der Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien. Denn je niedriger der Stromverbrauch ist, umso weniger müssen relativ teure Stromerzeugungstechniken eingesetzt werden. Zugleich schaffen Einsparungen beim Stromverbrauch größere zeitliche Spielräume für den Ausbau der erneuerbaren Energien und der notwendigen Infrastruktur (Stromnetze und -speicher).

Sensitivitätsanalysen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), bei denen die Kosten einer Vollversorgung mit erneuerbaren Energien im Jahr 2050 bei unterschiedlichen Stromverbräuchen geschätzt wurden, bestätigen die Kostenvorteile von Effizienzstrategien. Danach liegen die Gesamtkosten der Stromerzeugung in Deutschland bei 7 ct/kWh, falls der jährliche Stromverbrauch 500 TWh beträgt, bei einem Stromverbrauch von 700 TWh sind es knapp 10 ct/kWh.²⁶

3.1 Investitionskosten

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Entwicklung des Energiesystems werden regelmäßig vom Weltklimarat zusammengefasst, zuletzt in einem Sonderbericht zu den erneuerbaren Energien. Sie zeigen, dass die Kostenentwicklung der erneuerbaren Energien einen entscheidenden Einfluss auf den zukünftigen Energiemix hat.²⁷ Die Investitionskosten machen bei den erneuerbaren Energien einen Großteil der Gesamtkosten aus, für Windenergie und Solarenergie liegt der Anteil an den Gesamtkosten bei nahezu 95 Prozent. Im Vergleich dazu werden teilweise über 70 Prozent der Kosten fossiler Erzeugung durch die benötigten Brennstoffe bestimmt.²⁸

In den letzten Jahren waren bei der Solar- und Windenergie rasante Kostensenkungen zu verzeichnen. Die Preise für Photovoltaikmodule fielen vom Sommer 2008 bis Anfang 2012 um bis zu 76 Prozent.²⁹ Die Onshore-Windenergie durchlief eine ähnliche, wenn auch nicht ganz so dynamische Entwicklung. So sanken die durchschnittlichen Turbinenpreise pro Megawatt von 2009 bis 2011 um rund 25 Prozent. Entscheidend für die Kostensenkungen sind Lernkurveneffekte, welche eng mit der weltweiten ausgebauten Kapazität zusammenhängen (siehe Kasten 3).

Kasten 3: Lernkurveneffekte als Treiber für Kostensenkungen

In der Modellierung des Energiesystems und des Ausbaus erneuerbarer Energien für Zukunftsszenarien ist der Lernkurvenansatz inzwischen zum Standard geworden. Er geht davon aus, dass die Produktionskosten mit steigender Produktionsmenge um einen mehr oder weniger konstanten Prozentsatz sinken. Der Zusammenhang wurde erstmals 1925 im Flugzeugbau entdeckt und ist auch für viele Techniken erneuerbarer Energien empirisch bestätigt. Bei der Photovoltaik können z.B. 96 Prozent der Kostenentwicklung durch die Änderung der weltweit installierten Kapazität statistisch erklärt werden, bei Windturbinen sind es 82 Prozent.³⁰

Wesentlich für den Lernkurvenansatz sind die globale Marktentwicklung und die Lernrate. Die Lernrate ist ein Maß dafür, wie sich die spezifischen Investitionskosten einer Technologie prozentual verringern, wenn sich die installierte Kapazität (Marktentwicklung) verdoppelt. Wenn man die Produktionskosten gegenüber der installierten Kapazität abträgt, ergibt sich die sogenannte „Lernkurve“ (siehe exemplarisch Abbildung 10).

25 Vgl. IPCC (2007), S. 632 und Fraunhofer ISI/Ecofys/Öko-Institut (2012).

26 SRU (2011), S.197.

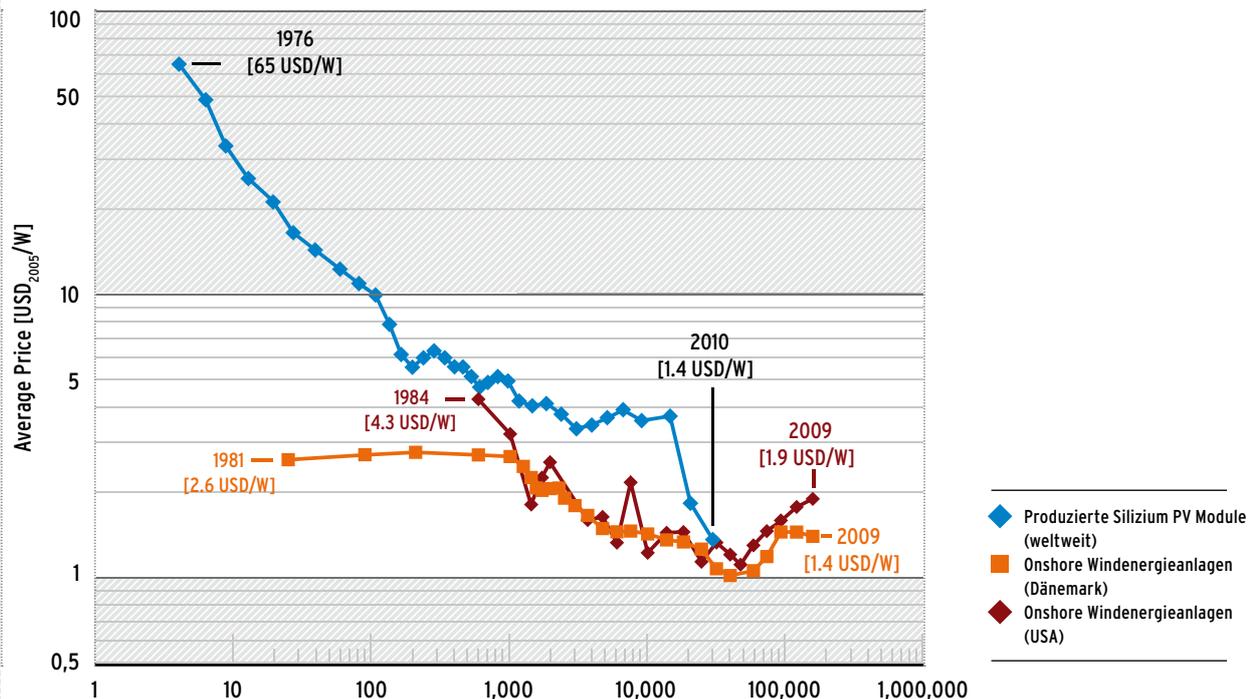
27 IPCC (2012).

28 IEA (2010b).

29 UNEP/Frankfurt School/BNEF (2012).

30 Nemet (2009).

Abbildung 10: Lernkurve für Photovoltaik Module und Onshore-Windenergieanlagen in USD₂₀₀₅/W³¹



Quelle: IPCC (2012), Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Abbildung SPM. 6 (linker Teil), Cambridge University Press.

Treiber der Lernkurve ist technologisches Lernen. Dabei geht es um Lernen bei der Verbesserung des Produktionsprozesses, Forschung und Entwicklung, um das bekannte „learning by doing“, um das „upsizing“ von Gütern wie Windturbinen und um Größenvorteile in der Produktion („economies of scale“).³²

Langfristig werden die Kosten der erneuerbaren Energien weiter sinken. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse der Meta-Studie des PIK für heutige Investitionskosten und das Jahr 2050. Sie verdeutlicht die zu erwartende Degression der spezifischen Investitionskosten bei den verschiedenen Formen der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Bis 2050 prognostizieren die analysierten Studien für die Photovoltaik sehr starke Kostensenkungen um durchschnittlich knapp 75 Prozent. Auch die Prognosen der anderen Technologien wie solarthermische Kraftwerke, Biomasse und Offshore-Windenergie weisen Kostensenkungen von bis zu 50 Prozent auf. Lediglich bei der Onshore-Windenergie werden keine großen Kostensenkungen mehr bis zum Jahr 2050 erwartet.

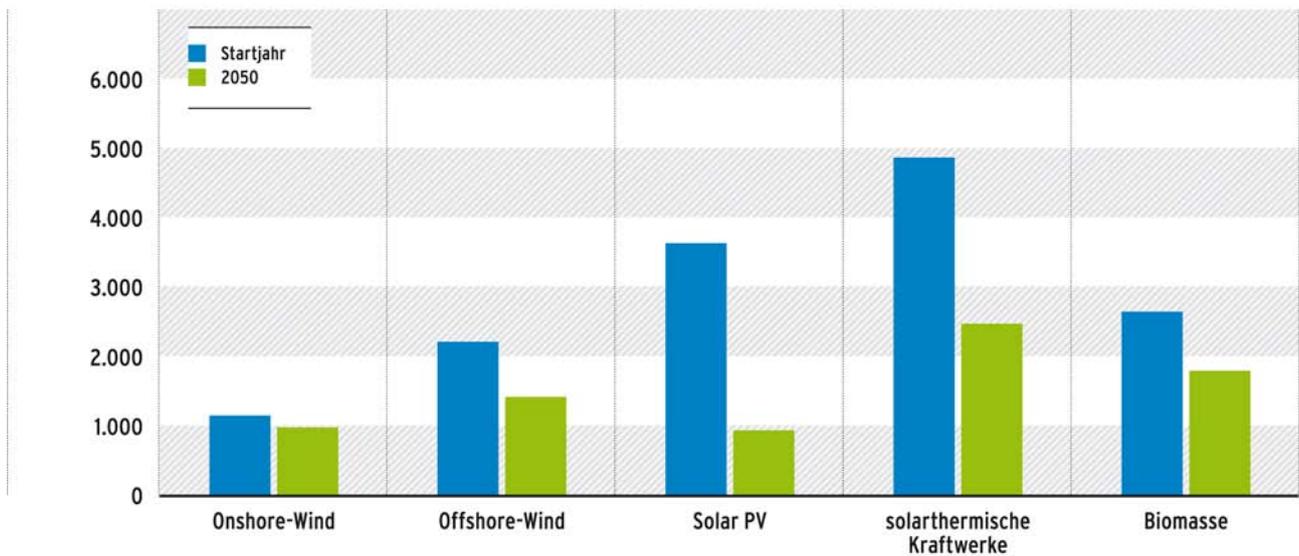
Im Startjahr ist Onshore-Windenergie über alle Studien hinweg die mit Abstand günstigste erneuerbare Energien Technologie.³³ Der Median der Kosten für Offshore-Windenergie und Biomasse liegt schon weit über den Kosten für Onshore-Windenergie, gefolgt von Photovoltaik und solarthermischen Kraftwerken. Durch die prognostizierten Kostensenkungen ergibt sich 2050 ein leicht verändertes Bild. Die Onshore-Windenergie weist zusammen mit der Photovoltaik die niedrigsten spezifischen Investitionskosten auf, mit deutlichem Abstand folgt die Offshore-Windenergie. Die Biomasse fällt im Ranking der Investitionskosten zurück. Solarthermische Kraftwerke weisen nach wie vor die höchsten Investitionskosten auf.

31 Die Achsenskalierung liegt in logarithmierter Form vor.

32 Für eine vertiefende Analyse zu Lernkurven vgl. Junginger u.a. (2006) oder PIK (2012).

33 Das Startjahr einer Studie ist das Jahr, zu dem relativ die weitere Entwicklung im Szenario fortgeschrieben wird. Die Spanne in den ausgewerteten Studien reicht von 2005 bis 2010. Zur besseren Vergleichbarkeit aller Werte wurden die jeweiligen Kostenangaben der Studien hinsichtlich des Bezugsjahrs und der Währung auf €2010 vereinheitlicht.

Abbildung 11: Median der spezifischen Investitionskosten im Startjahr und 2050 in €₂₀₁₀/kW



³⁵ Analysiert wurden die folgenden Studienergebnisse: Greenpeace/EREC (2010), WWF/Ecofys/Oma (2011), EC (2011), ECF (2010), EREC (2010), EWI/Energynautics (2011), DLR/IWES/IFNE (2010), SRU (2011), Prognos/Öko Institut (2009), Greenpeace/Eutech Energie und Management (2009), EWI/GWS/Prognos (2010), Wuppertal Institut/PIK (2010).

Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus PIK (2012)³⁴

3.2 Stromgestehungskosten

Nicht zuletzt infolge gesunkener Investitionskosten sind auch die Gestehungskosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien teilweise stark rückläufig. Betrachtet man die Entwicklung vom ersten Quartal 2011 bis zum ersten Quartal 2012, so sind die Stromgestehungskosten bei der Photovoltaik um rund 31-35 Prozent und bei Onshore-Windenergie um 9 Prozent gesunken, während die Kosten fossiler Erzeugung relativ konstant blieben.³⁵ Betrachtet man die Entwicklung der letzten zwei Jahre bis zum ersten Quartal 2012, dann fällt das Ergebnis für erneuerbare Energien noch deutlicher aus: Die Stromgestehungskosten durch Kohlekraftwerke stiegen um 9 Prozent, bei der Photovoltaik fielen sie dagegen um rund 44 Prozent und bei Onshore-Windenergie um 7 Prozent.³⁶

Gegen den Trend stiegen die Stromgestehungskosten von Offshore-Windenergie um 20 Prozent. Wesentliche Ursachen sind die vermehrte Durchführung von Offshore-Projekten in tiefem Wasser und mangelnder Wettbewerb in den Zulieferindustrien, z.B. für Anschlusskabel oder Offshore-Installationsschiffe. Durch verstärkten Wettbewerb bei den Zulieferern, zunehmendes Erfahrungswissen bei der Installation und effizientere Turbinen ist mit deutlich fallenden Kosten ab Mitte dieses Jahrzehnts zu rechnen. Auch die Kosten für Wellen- und Gezeitenkraftwerken sind gestiegen. Anlagen dieser Art befinden sich häufig noch in frühen Prototyp-Phasen. Wesentliche Kostensenkungen sind erst mit fortschreitender Technik und dem Eintritt in die Massenproduktion zu erwarten (vgl. Abbildung 12).³⁷

Ein Vergleich der Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien mit denen fossiler Erzeugung zeigt, dass heute schon viele erneuerbare Energien wettbewerbsfähig sind oder nur geringfügig über den Kosten fossiler Erzeugung liegen.³⁸ Noch deutlicher wird dies, wenn CO₂-Preise einbezogen werden (vgl. Abbildung 12, die dunkelgrüne Schattierung in den letzten beiden Zeilen der Abbildung zeigt die Stromgestehungskosten von Kohle- und Gaskraftwerken bei einem Preis von 36 US-Dollar pro Tonne CO₂).

³⁴ Analysiert wurden die folgenden Studienergebnisse: Greenpeace/EREC (2010), WWF/Ecofys/Oma (2011), EC (2011), ECF (2010), EREC (2010), EWI/Energynautics (2011), DLR/IWES/IFNE (2010), SRU (2011), Prognos/Öko Institut (2009), Greenpeace/Eutech Energie und Management (2009), EWI/GWS/Prognos (2010), Wuppertal Institut/PIK (2010).

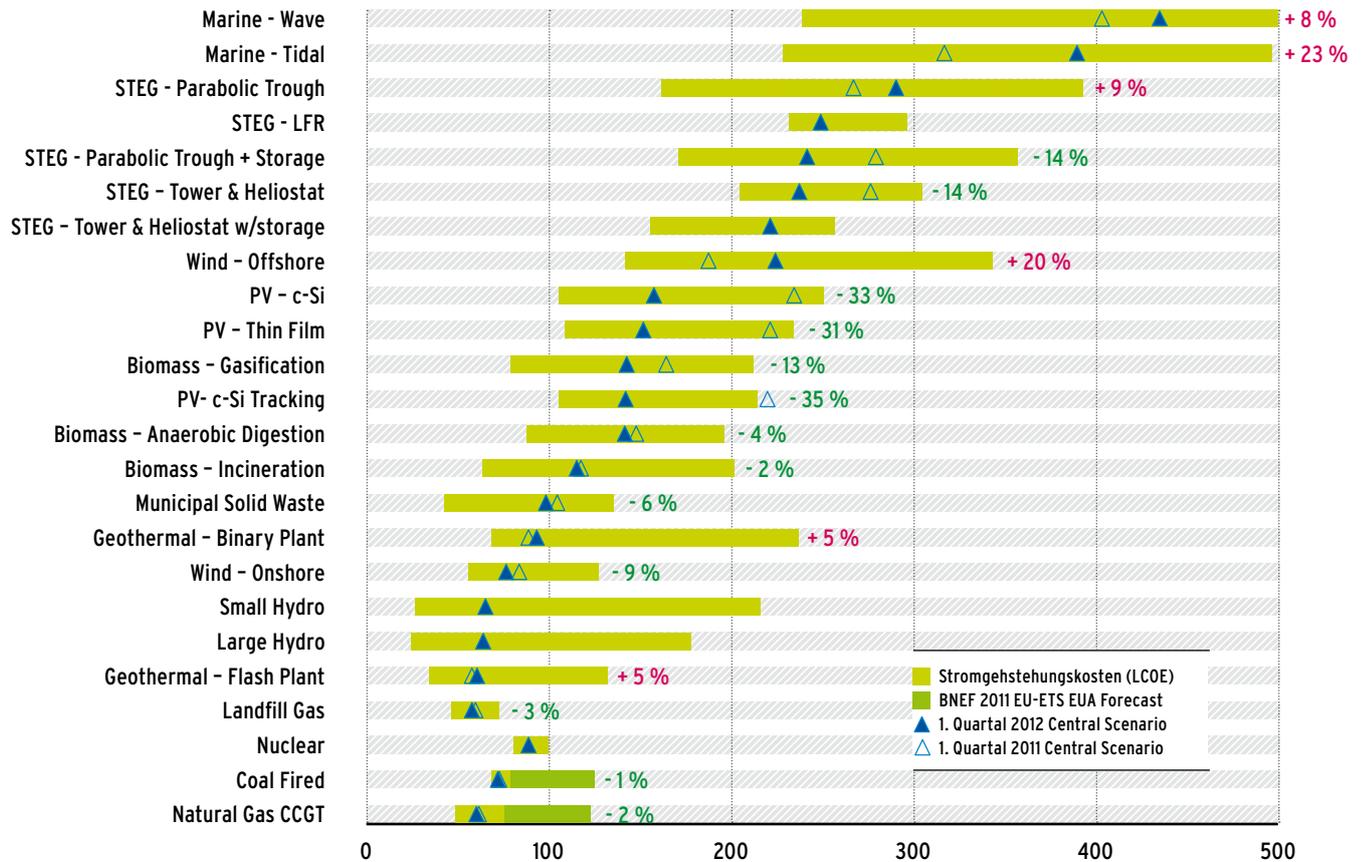
³⁵ UNEP/Frankfurt School/BNEF (2012), S. 33.

³⁶ UNEP/Frankfurt School/BNEF (2012), S. 34.

³⁷ UNEP/Frankfurt School/BNEF (2012).

³⁸ Der Weltklimarat IPCC (2012) S. 28 kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Nicht berücksichtigt sind dabei die Kosten der Systemintegration der erneuerbaren Energien (vgl. Kapitel 3.3).

Abbildung 12: Stromgestehungskosten für verschiedene Technologien für das erste Quartal 2012 und 2011 in \$ pro MWh



Quelle: UNEP/Frankfurt School/BNEF (2012), S. 33³⁹

Kasten 4: Wirtschaftlichkeit kleiner Photovoltaikanlagen

Die Wirtschaftlichkeit kleiner Photovoltaikanlagen wird häufig mit den Stromgestehungskosten großer Erzeuger verglichen. Allerdings sind z.B. für Haushalte mit einer Aufdachanlage nicht die Stromgestehungskosten entscheidend für die Wirtschaftlichkeit, sondern die Endkunden-Strompreise. Schon heute erzielen Photovoltaik-Dachanlagen durch den eingesparten Strombezug in einigen Ländern eine Rendite von mindestens 5 Prozent.⁴⁰ Dies gilt z.B. für Dänemark, Teile von Australien, Deutschland, Spanien und Italien.⁴¹

Bis 2015 könnte dies – weitere Kostendegression der Photovoltaik vorausgesetzt – auch auf Frankreich, Japan, Teile der USA und die Türkei zutreffen.⁴² Auch in vielen Gebieten in Afrika, Indien, Südostasien und Teilen des Mittleren Ostens ohne bzw. mit lokalen von Dieselgeneratoren versorgten Netzen ist der Betrieb von Photovoltaikanlagen wirtschaftlich. McKinsey schätzt, dass das weltweite ökonomische Potential für installierte Photovoltaikanlagen bis 2020 ein Terawatt (TW) überschreiten wird.⁴³ Zum Vergleich: Die weltweite installierte Kapazität lag 2010 bei knapp 40 GW⁴⁴ – einem Bruchteil des nach McKinsey bis 2020 zu erwartenden ökonomischen Potentials.

39 Die hellgrünen Balken zeigen die Spannweite der Stromgestehungskosten in Abhängigkeit z.B. vom Standort oder angenommenen Kapitalkosten. In die LCOE der Atomkraft fließen nicht die vollen Kosten durch spätere Stilllegung und Entsorgung der Atomkraftanlagen oder die ungenügenden Deckungssummen im Falle eines nuklearen Unfalles mit ein.

40 Diese Rendite beruht auf einer einzelwirtschaftlichen Betrachtung, die Kosten der Systemintegration sind hierbei z.B. nicht berücksichtigt.

41 Bloomberg (2012).

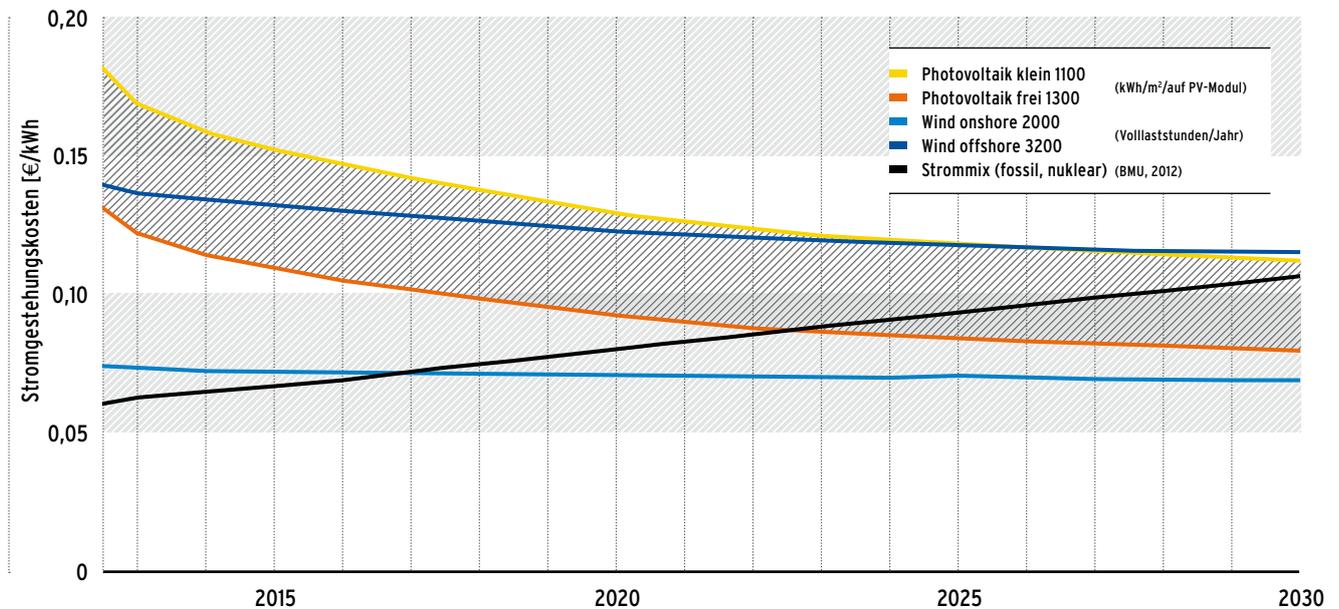
42 Bloomberg (2012).

43 McKinsey (2012).

44 IEA (2011a), S. 42.

Prognosen zeigen, dass die Stromgestehungskosten der erneuerbaren Energien in den nächsten Jahren weiter deutlich sinken werden, während die Kosten fossiler Erzeugung einen steigenden Trend aufweisen (vgl. Abbildung 13). Das Schaubild für Deutschland zeigt, dass Photovoltaik bei einer jährlichen Einstrahlung von 1300 kWh/m²/Jahr Mitte des nächsten Jahrzehnts und Onshore-Windenergie schon Mitte dieses Jahrzehnts wettbewerbsfähig werden. Die Stromgestehungskosten von Onshore-Windenergie liegen schon heute mit rund 7,5 ct/kWh nur knapp über den Kosten fossiler Erzeugung.⁴⁵

Abbildung 13: Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien in Deutschland im Vergleich zur fossilen Stromerzeugung



Quelle: FH ISE (2012) S. 18

3.3 Differenzkosten

Der Ausbau der erneuerbaren Energien wird oft mit Hinweis auf die hohen Zusatzkosten gegenüber einer konventionellen, auf fossilen Energien basierenden Stromerzeugung abgelehnt. Daher ist es wichtig zu wissen, ob und inwieweit solche Zusatzkosten entstehen, wie sie sich in Zukunft entwickeln und wodurch sie begründet sind. Eine Analyse der systemanalytischen Differenzkosten leistet hierzu einen wichtigen Beitrag.

Für Deutschland liegen Schätzungen zur langfristigen Entwicklung der Differenzkosten vor.⁴⁶ Dabei werden die Differenzkosten unter verschiedenen möglichen Preispfaden (A, B und C) der fossilen Energieträger dargestellt (vgl. Abbildung 14). Das Referenzszenario, das in der Abbildung als Nulllinie dargestellt ist, bildet in der Studie ein fossil-nuklearer Kraftwerkspark (Mix von Alt- und Neukraftwerken). Die Szenarienanalysen zeigen für Deutschland, dass der Umbau des Energiesystems jährliche Differenzkosten von maximal 14 Milliarden Euro verursachen wird. Diese Kosten erreichen bis 2020 ihr Maximum und fallen dann stark ab.

⁴⁵ FH ISE (2012).

⁴⁶ DLR/IWES/IFNE (2011).

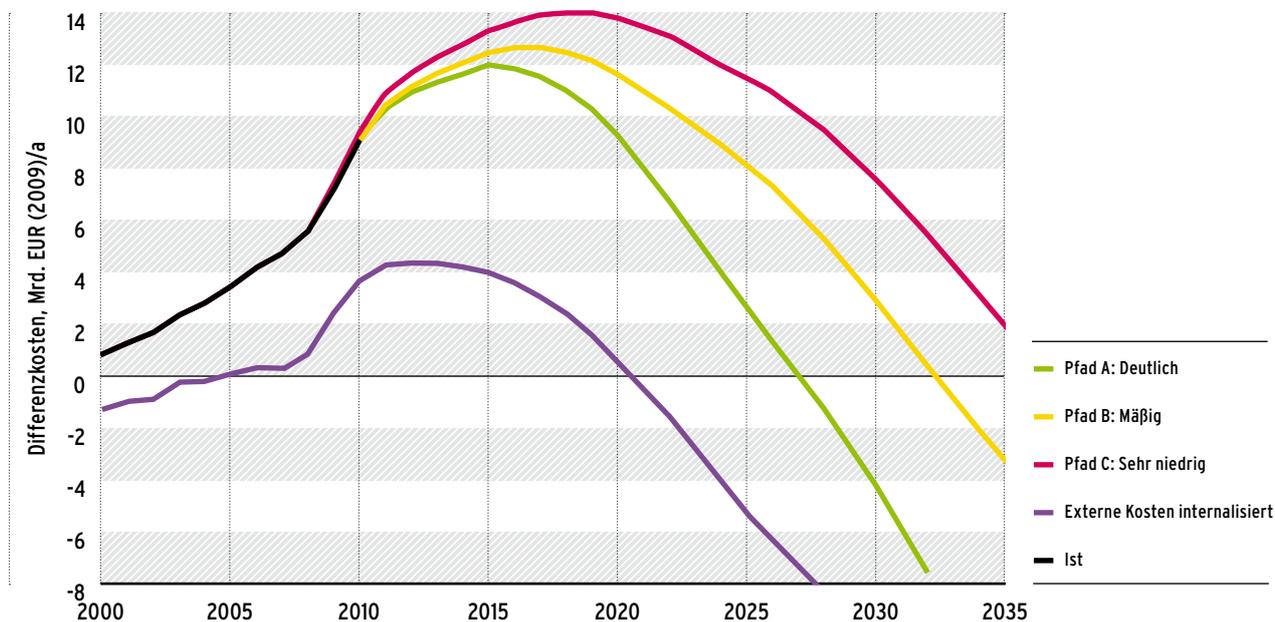
Kasten 5: Relevanz bestehender Anlagen für zukünftige Ausbauentscheidungen

Investitionskosten bestehender Anlagen zur Stromgewinnung aus erneuerbaren Energien sind aus ökonomischer Sicht sogenannte versunkene Kosten (sunk cost) und damit für zukünftige Ausbauentscheidungen nicht mehr maßgeblich. Für die wirtschaftliche Bewertung des weiteren Ausbaus erneuerbarer Energien zählen nur die Investitions- und weiteren Folgekosten neuer Anlagen. Dies gilt auch für den Fall, dass nationale Fördersysteme die Finanzierung bereits errichteter Anlagen noch auf Jahre sicherstellen.

So sind zum Beispiel in Deutschland in der Vergangenheit hohe Kosten durch den Ausbau der Photovoltaik entstanden. Dies hat sich in einer kräftigen Erhöhung der Umlage aus dem Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG-Umlage) niedergeschlagen. Der weitere Zubau der Photovoltaik wird die Umlageentwicklung jedoch nur noch geringfügig beeinflussen, da die Differenzkosten durch die stark sinkenden Kosten der Photovoltaik rapide zurückgehen. Je Gigawatt zusätzlicher Photovoltaik-Leistung steigt die EEG-Umlage im Jahr 2012 voraussichtlich nur um 0,035 Cent/kWh, bis 2016 wird sogar eine Steigung um nur noch 0,016 Cent₂₀₁₂/kWh erwartet.⁴⁷

Je nach unterstelltem Preispfad für die fossilen Energieträger werden die systemanalytischen Differenzkosten schon ab dem Jahr 2027 negativ, d.h. die erneuerbaren Energien sind dann günstiger als eine fossile Stromerzeugung.⁴⁸ Dies zeigt, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien langfristig Kostenvorteile schafft.⁴⁹ Schon 2030 werden die durchschnittlichen Gestehungskosten erneuerbarer Energien in Deutschland voraussichtlich rund 7,6 ct/kWh betragen. Strom aus neuen Erdgas- und Kohlekraftwerken schlägt dann voraussichtlich mit über 9 ct/kWh zu Buche.⁵⁰

Abbildung 14: Systemanalytische Differenzkosten des Ausbaus erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung



Quelle: DLR/IWES/IFNE (2011). Die Differenzkosten basieren auf dem Szenario A.

47 Prognos (2012). Die Ergebnisse sind als Indikation zu verstehen, die u.a. von Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Marktprämie, des Grünstromprivilegs, neuer Härtefallregelungen, den Wind- und Solarertrag, neuer Vergütungssätze und der Strompreisentwicklung abhängen.

48 Nicht berücksichtigt sind hierbei die Kosten für Netzausbau und Systemintegration der erneuerbaren Energien durch Lastmanagement und Stromspeicherung. Sie gewinnen mit zunehmendem Ausbau der erneuerbaren Energien an Bedeutung.

49 Bei einer Internalisierung der externen Kosten (siehe lila Linie) ergeben sich schon erheblich früher negative Differenzkosten (siehe Kapitel 4.4).

50 Ohne Berücksichtigung der Kosten für den Netzausbau, Lastmanagement und Speicherkosten.

In Abbildung 14 sind die Kosten des Netzausbaus noch nicht berücksichtigt. Die Obergrenze der notwendigen Netzinvestitionen bei einem Ausbau der erneuerbaren Energien beträgt nach aktuellen Schätzungen rund 5 Milliarden Euro pro Jahr für das Gesamtnetz (Übertragungs⁵¹- und Verteilernetze). Davon können rund 2,3 Milliarden Euro pro Jahr als zusätzliche Aufwendungen dem Zubau erneuerbarer Energien zugeordnet werden. Unter Berücksichtigung des zusätzlichen Netzausbaus würden die Differenzkosten unter Preispfad A um rund 12-13 Prozent höher ausfallen.⁵² Nicht berücksichtigt sind dabei der durch den Ausbau der erneuerbaren Energien erforderliche Zubaubedarf im europäischen Stromverbund und die Kosten der Systemintegration der erneuerbaren Energien.

3.4 Wettbewerbsverzerrungen durch externe Umweltkosten und umweltschädliche Subventionen

Die Stromerzeugung auf fossiler Basis erzeugt erheblich höhere gesellschaftliche Folgekosten als eine Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien. Da diese Folgekosten nur unzureichend internalisiert werden, entstehen Wettbewerbsverzerrungen zu Lasten der erneuerbaren Energien. Bezieht man die externen Kosten der fossilen Stromerzeugung in die Betrachtung ein, verändern sich die Differenzkosten erheblich (lila Linie in Abbildung 14).⁵³ Danach verursachte der Ausbau der erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2005 gesamtwirtschaftlich gesehen keine Zusatzkosten, sondern Kostenvorteile. Zwischen 2005 und 2020 entstehen zwar unter Berücksichtigung der externen Kosten Differenzkosten, sie belaufen sich aber auf jährlich maximal rund 4 Milliarden Euro. Nach dem Jahr 2020 entstehen erneut Kostenvorteile, die im Zeitablauf immer stärker werden.

Explizite und implizite⁵⁴ Subventionen für fossile Energieträger und die Atomenergie verzerren ebenfalls den Wettbewerb zu Lasten der erneuerbaren Energien und behindern dadurch den Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung. Die Internationale Energieagentur (IEA) schätzt die weltweiten Subventionen für fossile Energieträger auf 409 Milliarden Dollar in 2010.⁵⁵ Davon entfallen auf die Stromversorgung 122 Milliarden Dollar. Die Subventionierung fossiler Energieträger wird häufig mit sozialen Zielen gerechtfertigt. Allerdings stellt die IEA fest, dass nur 8 Prozent der Gesamtsubventionen den ärmsten 20 Prozent der Weltbevölkerung zu Gute kommen. Außerdem verhindern die Subventionen, dass sich Unternehmen und private Haushalte rechtzeitig auf knapper werdende fossile Energieträger einstellen. Die Fördermaßnahmen zur Markteinführung der erneuerbaren Energien im Strombereich beliefen sich 2010 auf 44 Milliarden Dollar – somit waren die Subventionen für die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern um den Faktor 3 höher. Die Vorteile zu Gunsten der Atomenergie – etwa die begrenzte Haftung bei Unfällen in kerntechnischen Anlagen – lassen sich nur sehr schwer monetär beziffern. Sie begünstigen die Atomenergie weltweit jedoch beträchtlich. So ist in Deutschland die Atomenergie nur deshalb einzelwirtschaftlich rentabel, weil sie in Milliardenhöhe durch explizite und implizite Subventionen gefördert wird.⁵⁶

4 GESAMTWIRTSCHAFTLICHE WIRKUNGEN DES AUSBAUS ERNEUERBARER ENERGIEN IN DER STROMERZEUGUNG

4.1 Investitionsimpulse und Wachstumswirkungen

Die Investitionen in erneuerbare Energien steigen rapide. Zwischen 2004 und 2011 haben sie sich verfünffacht und betragen 2011 bereits 257 Milliarden US-Dollar (siehe Abbildung 15). Im Stromsektor machen erneuerbare Energien inzwischen fast die Hälfte der weltweit zugebauten Erzeugungskapazitäten aus.⁵⁷

51 Für Deutschland liegen nach dem aktuellen Netzentwicklungsplan die Gesamtinvestitionen für den Ausbau der Übertragungsnetze in den nächsten zehn Jahren bei ca. 20 Milliarden Euro. ÜNB (2012).

52 Vgl. DLR/IWES/IFNE (2011), S. 29.

53 Angenommene Preisentwicklung fossiler Energieträger analog zu Preispfad A.

54 Implizite Subventionen sind verdeckte Vergünstigungen, die nicht direkt budgetwirksam sind, z.B. Bürgschaften oder Garantien. Auch die wirtschaftlichen Vorteile durch die unentgeltliche Vergabe von Emissionsrechten stellt eine implizite Subvention dar.

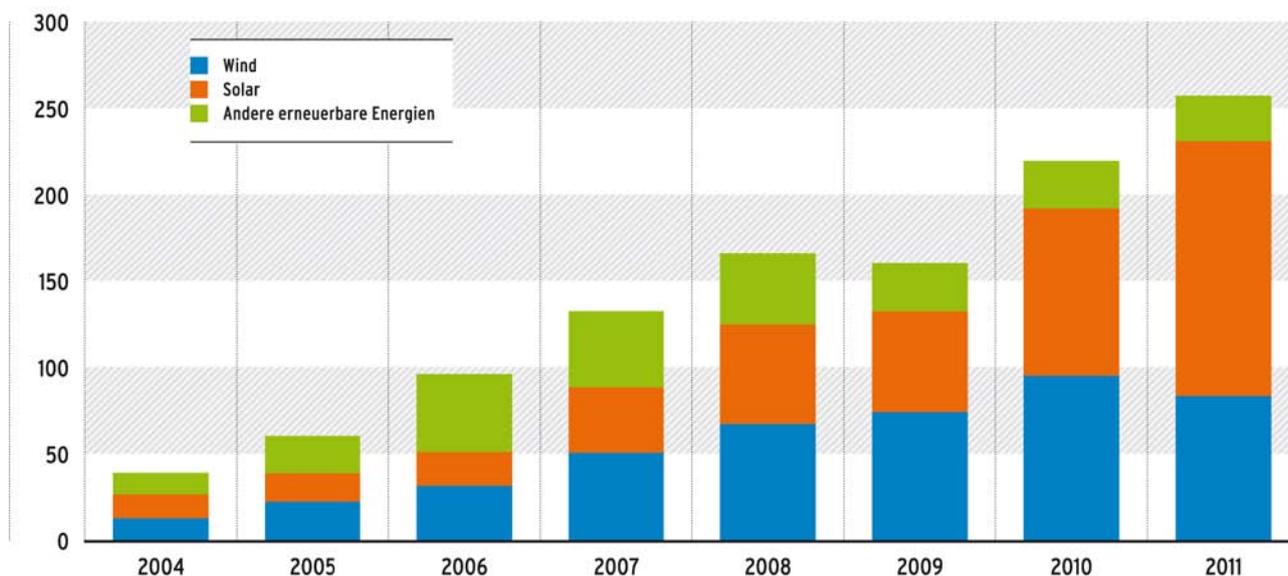
55 IEA (2011b), Kapitel 14.

56 UBA (2010c) Umweltbundesamt: Umweltschädliche Subventionen in Deutschland, aktualisierte Ausgabe 2010.

57 UNEP/Frankfurt School/BNEF (2012), S. 31. Der Anteil erneuerbarer Energien am Kapazitätzzubau betrug 43,7 Prozent in 2011.

Der Weltmarkt für umweltfreundliche Energien, der erneuerbare Energien, effiziente Kraftwerkstechniken und Energiespeicher umfasst, gehört zu den wichtigsten grünen Zukunftsmärkten. Aktuell beträgt das Weltmarktvolumen 313 Milliarden Euro – bis 2025 soll es auf 1060 Milliarden Euro wachsen. Dies bedeutet ein jährliches Marktwachstum von 9,1 Prozent.⁵⁸ Besonders schnell wächst die Nachfrage nach Photovoltaikanlagen. Waren 2011 weltweit insgesamt rund 65 GW installiert, wird die Kapazität bis 2020 auf 400 bis 600 GW anwachsen.⁵⁹ Erneuerbare Energien sind deshalb nicht nur aus Gründen des Klima- und Umweltschutzes geboten, sondern auch ein wichtiger Zukunftsmarkt von hoher ökonomischer Relevanz für alle Volkswirtschaften im internationalen Wettbewerb.

Abbildung 15: Globale Investitionen in erneuerbare Energien 2004-2011 in Milliarden US-Dollar



Quelle: Zahlen aus UNEP/Frankfurt School/BNEF (2012), S. 15.

Der globale Umbau des Stromversorgungssystems erfordert in den kommenden Jahrzehnten erhebliche zusätzliche Investitionen. Dies zeigen Klimaschutzszenarien zur Einhaltung der 2-Grad-Obergrenze der Erderwärmung. Einen besonders ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien enthält die Energy [R]evolution-Studie. 2050 stammen in ihrem Klimaschutzszenario 94,3 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Energien. Um dies zu erreichen sind von 2011 bis 2050 Investitionen von rund 50 Billionen Dollar erforderlich, davon in erneuerbare Energien insgesamt 47 Billionen Dollar, für die Erzeugung aus fossilen Energien und der Atomkraft sind es 3,4 Billionen Dollar. Im Referenzszenario sind dagegen die Investitionen in den Stromsektor mit insgesamt 22,3 Billionen Dollar nicht einmal halb so hoch und nur die Hälfte der Gesamtinvestitionen fließt in erneuerbare Energien.

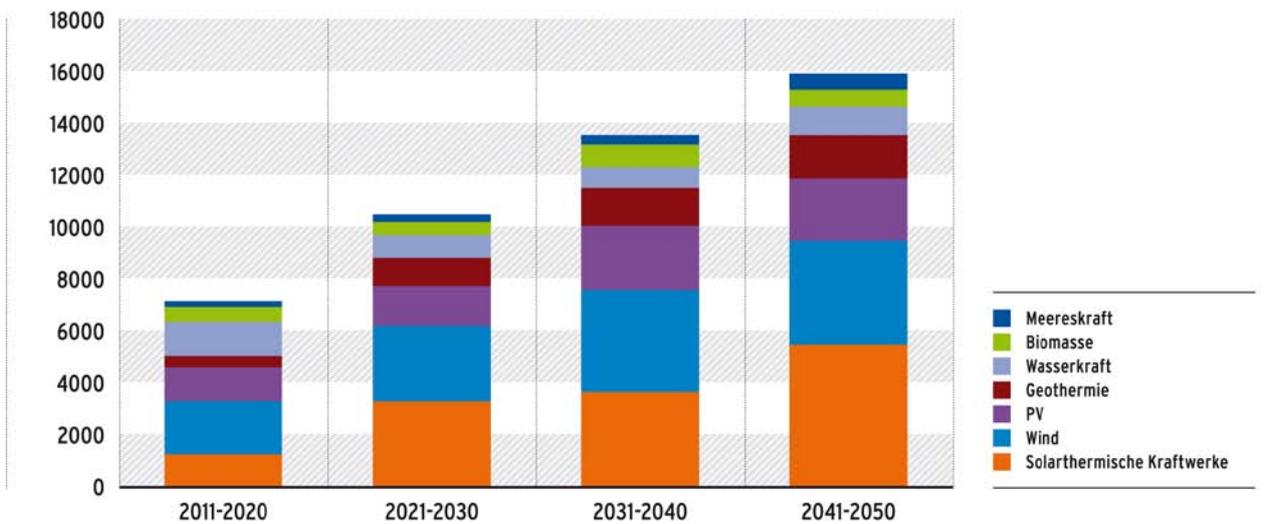
Durchschnittlich betragen die Investitionen in erneuerbare Energien beim Ausbauszenario 1,2 Billionen Dollar pro Jahr.⁶⁰ Abbildung 16 zeigt die benötigten Investitionen für die verschiedenen Erzeugungsförmungen und Dekaden bis 2050.

58 BMU (2012b), S. 45.

59 McKinsey (2012), S. 2. Auch die europäische PV-Industrie prognostiziert ein erhebliches globales Kapazitätswachstum. In 2016 gibt sie für die kumulierte globale Kapazität eine Spanne von 208 bis 343 GW an (EPIA, 2012, S. 45).

60 Greenpeace/EREC/GWEC (2012), S. 280.

Abbildung 16: Globales Investitionsvolumen der erneuerbaren Energien im Stromsektor in den Dekaden bis 2050 in Milliarden US-Dollar



Quelle: Greenpeace/EREC/GWEC (2012, 280).

Ein Vergleich der für den Umbau des Energiesystems benötigten Investitionen mit der aktuellen Entwicklung zeigt, dass die Investitionen im Energiebereich deutlich forciert werden müssen. Besonders im Bereich von Forschung und Entwicklung besteht eine Investitionslücke, schon heute fehlen jährlich 40-90 Milliarden US-Dollar.⁶¹

Für die gesamtwirtschaftliche Beurteilung des Ausbaus der erneuerbaren Energien und der damit verbundenen Transformation der Stromversorgung sind Modellsimulationen notwendig, um Rückkopplungseffekte zu berücksichtigen, etwa zwischen Energiepreisen und Wirtschaftswachstum.⁶² Solche Analysen beziehen in der Regel das gesamte Energiesystem ein, also nicht nur die Stromversorgung.

Globale Simulationsmodelle untersuchen, wie die Einhaltung der 2-Grad-Obergrenze der Erderwärmung gelingen kann – meist unter der Prämisse einer Minimierung der Vermeidungskosten. Das Vergleichsszenario ist dabei eine Referenzentwicklung ohne Klimapolitik. Modelle, die vergleichsweise stark auf einen Ausbau der erneuerbaren Energien setzen, weisen dabei Einbußen des weltweiten Konsums um lediglich rund ein Prozent bis zum Jahr 2100 aus.⁶³ Sie unterscheiden sich damit kaum von Szenarien mit großen Anteilen von Atomenergie und Stromerzeugung auf Basis fossiler Energien. Zugleich ist der Konsumverlust marginal: Bei einer wachsenden Weltwirtschaft wird das Konsumniveau der Referenzentwicklung ohne Klimaschutz auch bei starkem Ausbau der erneuerbaren Energien lediglich um wenige Monate verzögert erreicht.

Der ökonomische Nutzen des Klimaschutzes wird in den Simulationen in der Regel aus methodischen Gründen nicht berücksichtigt. Unterm Strich übersteigt er bei weitem die leichte Dämpfung im Konsumniveau (vgl. Kapitel 5.1.).

Darüber hinaus sind die positiven Wirkungen auf die Versorgungssicherheit aus gesamtwirtschaftlicher Sicht von hoher Relevanz. Denn erneuerbare Energien diversifizieren das Energieangebot, verringern die benötigten Energieimporte und die Abhängigkeit von den stark schwankenden internationalen Energiepreisen.⁶⁴

61 WBGU (2011), S. 171 und IEA (2010a), S. 480.

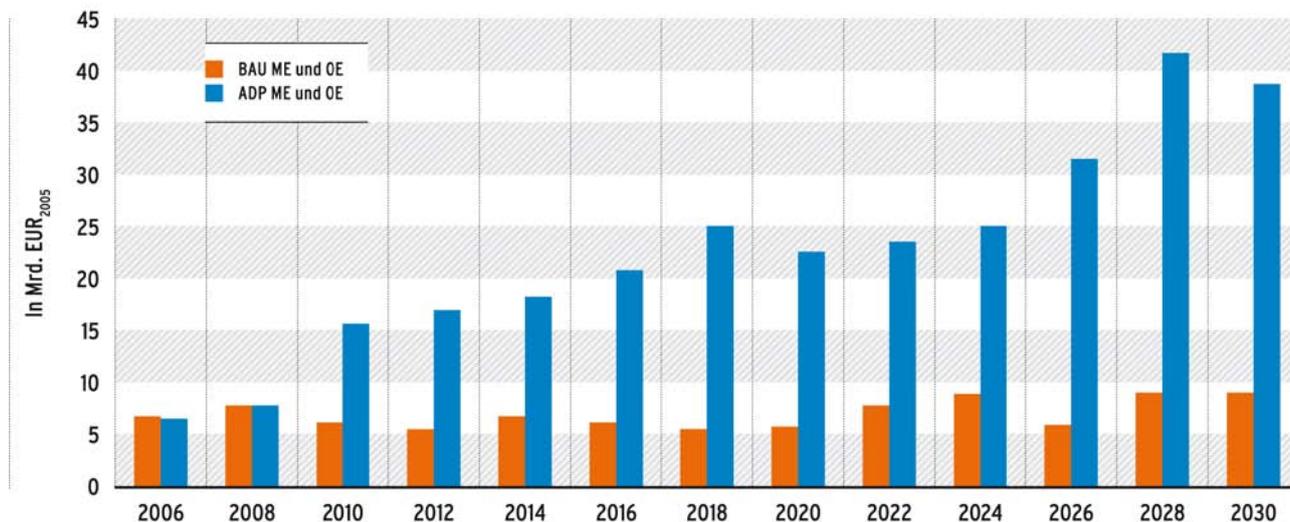
62 Um die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen der Investitionen in erneuerbare Energien ermitteln zu können, müssen die vermiedenen Investitionen in der konventionellen Stromerzeugung ebenso berücksichtigt werden wie die eingesparten Brennstoffe. Diese werden bei vielen erneuerbaren Energien im Betrieb so gut wie nicht mehr benötigt.

63 Edenhofer u.a. (2009), S. 25 und IPCC (2012) S. 811. Dem liegt ein Modellvergleich verschiedener Simulationsmodelle und ein 450 ppm Klimapfad zu Grunde. Vergleichsweise hohe Beiträge der erneuerbaren Energien verzeichnet das REMIND-R Modell, dessen ausgewiesene Konsumeinbußen deutlich unter 1 Prozent bleiben.

64 IPCC (2012), S. 880.

Modellrechnungen zu den Wachstumswirkungen eines Ausbaus der erneuerbaren Energien liegen für die Europäische Union (EU) und Deutschland vor. Dabei kommen die Simulationsrechnungen für die EU zu positiven Wachstumswirkungen. Den Schätzungen liegt das Ziel der EU zugrunde, bis 2020 den Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch auf 20 Prozent zu steigern. Im Vergleich zum Referenzszenario, in dem die erneuerbaren Energien nicht gefördert werden, wächst das Bruttoinlandsprodukt (BIP) bis 2020 zwischen 0,23 und 0,25 Prozent – abhängig vom Simulationsmodell. Von zentraler Bedeutung sind dabei die starken Investitionsimpulse durch den Ausbau der erneuerbaren Energien (vgl. Abbildung 17). Bei den Modellrechnungen wurde angenommen, dass die Förderung der erneuerbaren Energien nur zu moderaten Exportzuwächsen bei den erneuerbaren Energien führt – insofern sind die Schätzungen zu den Wachstumswirkungen eher konservativ.

Abbildung 17: Investitionsimpuls durch erneuerbare Energien in der EU



Quelle: Ragwitz u.a. (2009) S. 172.

Für Deutschland zeigen Modellrechnungen ebenfalls moderat positive Wachstumseffekte. Nach dem Leitszenario 2009, welches in 2030 im Strombereich einen Anteil der erneuerbaren Energien von knapp 64 Prozent aufweist, steigt das Bruttoinlandsprodukt um rund 22 bis 29 Milliarden Euro gegenüber einem Referenzszenario ohne einem Ausbau erneuerbarer Energien.⁶⁵

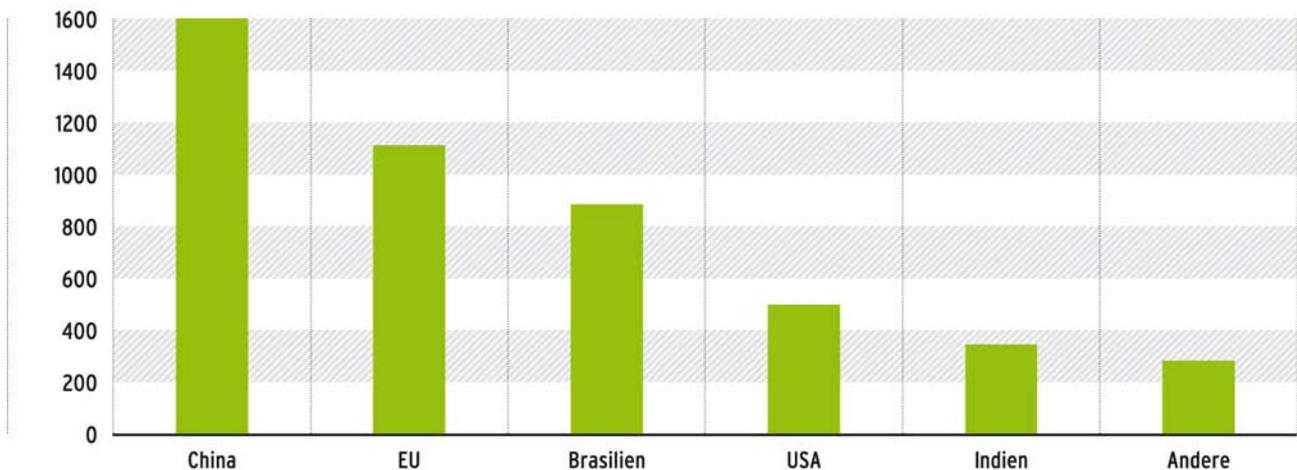
4.2 Beschäftigungswirkungen

Weltweit waren 2011 bereits rund 5 Millionen Menschen im Bereich erneuerbare Energien beschäftigt (vgl. Abbildung 18). Mit 1,6 Millionen Arbeitsplätzen weist China die meisten Beschäftigten auf, vor der EU und Brasilien mit 1,1 und 0,9 Millionen Personen.⁶⁶ Diese Schätzungen beziehen sich auf die erneuerbaren Energien insgesamt, d.h. sie umfassen nicht nur die Stromerzeugung. Die Zahl der Beschäftigten wird angesichts der prognostizierten Wachstumsraten bei den erneuerbaren Energien zukünftig weiter steigen.

⁶⁵ Lehr u.a. (2011), S. 212. Zum Ausbaupfad vgl. S. 116 und S. 132ff.

⁶⁶ REN21 (2012), S. 27.

Abbildung 18: Arbeitsplätze im Bereich erneuerbare Energien in 2011 [in Tausend]



Quelle: REN21 (2012), S. 27.

Die Energy-[R]evolution-Studie kommt in einer groben Schätzung zu dem Ergebnis, dass die direkten Beschäftigungswirkungen im Energiesystem und in vorgelagerten Prozessen bei einem ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien positiv sind. Insgesamt würde bis 2020 im Vergleich zum Referenzszenario ein Zuwachs von rund 4,9 Millionen Arbeitsplätzen entstehen. Beim Ausbau der erneuerbaren Energien würden 22,6 Millionen Beschäftigte im Energiesystem arbeiten, davon entfielen etwa 13 Millionen Arbeitsplätze auf die erneuerbaren Energien (im Referenzszenario wären es lediglich 6,2 Millionen Personen).⁶⁷

Modellrechnungen für die Europäische Union (EU) kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien in erheblichem Umfang Arbeitsplätze schafft. Die EU verfolgt das Ziel, bis 2020 den Anteil der erneuerbaren Energien auf 20 Prozent zu steigern. Die Beschäftigung steigt dadurch im Jahr 2020 unterm Strich EU-weit um rund 400.000 Arbeitsplätze.⁶⁸

Auch die Projektionen für einen weiteren, ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland kommen zu positiven Beschäftigungseffekten. Nach einer Anfang 2011 veröffentlichten Untersuchung ist bis 2030 ein Anstieg der Beschäftigung im Bereich erneuerbarer Energien in Deutschland auf 479.000 bis 589.000 Personen möglich.⁶⁹ Die angegebene Spanne beruht auf unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung der Exporte. Im Jahr 2011 waren bereits 381.600 Personen im Bereich erneuerbare Energien beschäftigt (vgl. Abbildung 2).

Die Untersuchung zeigt, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien auch per Saldo mehr Arbeitsplätze schafft. Im Jahr 2030 steigt die Beschäftigung um netto 143.000 bis 182.000 Personen.⁷⁰ Berücksichtigt sind dabei auch die entstehenden Beschäftigungsverluste durch den Ausbau der erneuerbaren Energien, zum Beispiel durch entstehende Strompreissteigerungen. Dass der Ausbau der erneuerbaren Energien zu positiven Nettobeschäftigungseffekten führt, hat verschiedene Gründe. Tendenziell profitieren durch die erneuerbaren Energien eher arbeitsintensive Sektoren. Außerdem ersetzen erneuerbare Energien in erheblichem Umfang Importe durch inländische Wertschöpfung, indem sie den Verbrauch fossiler Energieträger wie Öl oder Gas verringern.

67 Vgl. Greenpeace/EREC/GWEC (2012), S. 192. Volkswirtschaftliche Rückkoppelungseffekte, die aus der Transformation des Energiesystems resultieren, bleiben in der Studie unberücksichtigt.

68 Ragwitz u.a. (2009), S. 188ff.

69 Lehr u.a. (2011), S. 199. Die genannten Werte beziehen sich auf ein Szenario mit verhaltener Energiepreisentwicklung und einem robusten PV-Ausbau. Das Null-Szenario enthält dabei so gut wie keinen Ausbau der erneuerbaren Energien seit 1995.

70 Lehr u.a. (2011), S. 212.

4.3 Vermiedene gesellschaftliche Folgekosten durch den Ausbau erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung

Die gesellschaftlichen Folgekosten der Stromerzeugung hängen entscheidend von den eingesetzten Energieträgern ab. So entstehen bei der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern in erheblichem Umfang Kohlendioxidemissionen, die zum Klimawandel beitragen. Wie wichtig dieser Aspekt für die ökonomische Bewertung der erneuerbaren Energien ist, zeigt der Stern-Report.⁷¹ Er schätzt die Kosten eines ungebremsten Klimawandels auf 5 bis 20 Prozent des weltweiten Pro-Kopf-Bruttosozialprodukts.

Außerdem entstehen bei der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen Umwelt- und Gesundheitsschäden durch andere Luftschadstoffe, wie Feinstäube und Stickstoffoxide. Sie verursachen Erkrankungen (Asthma, Husten oder Bronchitis) und Schäden an Gebäuden (Fassadenverschmutzung). Die gesundheitlichen Folgen sind erheblich. Weltweit führen allein die anthropogenen Feinstaubemissionen (PM_{2,5}) jährlich zu rund 3,7 Millionen frühzeitigen Todesfällen.⁷² In Europa und großen Teilen Asiens sind Feuerungsanlagen der Energieerzeugung für 13 Prozent der Feinstäube verantwortlich.⁷³ Dies macht deutlich, dass energiepolitische Entscheidungen zu kurz greifen, wenn sie lediglich auf einem Vergleich der einzelwirtschaftlichen Kosten der Stromerzeugung beruhen.

Schätzungen für Deutschland zeigen, dass Strom aus Braunkohle die höchsten spezifischen Umweltkosten erzeugt, gefolgt von Steinkohle und Öl (vgl. Abbildung 19). Erdgas rangiert – bereits mit einigem Abstand – an vierter Stelle. Die weitaus niedrigsten Umweltkosten weist Strom aus erneuerbaren Energien auf. So liegen zum Beispiel bei Windenergie die Umweltkosten etwa um den Faktor 40 niedriger als bei der Stromerzeugung aus Braunkohle. Dies macht deutlich, dass eine Umstellung der Stromversorgung auf erneuerbare Energien einen hohen gesamtwirtschaftlichen Nutzen durch vermiedene gesellschaftliche Folgekosten stiftet.

Aktuellen Schätzungen zufolge führte der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland allein in der Stromversorgung zu eingesparten Umweltkosten von rund 8 Milliarden Euro im Jahr 2011. Zusammen mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien im Wärmebereich betragen die vermiedenen Umweltkosten gut 10 Milliarden Euro. Im Jahr 2020 werden die Einsparungen bereits rund 15,4 Milliarden Euro betragen, sofern man davon ausgeht, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien die politisch vorgegebenen Ziele erreicht.⁷⁴

Abbildung 19: Umweltkosten der Stromerzeugung (2010 in Cent / kWh_{el})

Stromerzeugung durch	Luftschadstoffe	Treibhausgase	Umweltkosten gesamt
Braunkohle	2,07	8,68	10,75
Steinkohle	1,55	7,38	8,94
Erdgas	1,02	3,90	4,91
Öl	2,41	5,65	8,06
Erneuerbare Energien			
Wasserkraft	0,14	0,04	0,18
Windenergie	0,17	0,09	0,26
Photovoltaik	0,62	0,56	1,18
Biomasse*	1,07	2,78	3,84

* Nach Erzeugungsanteilen gewichteter Durchschnittswert für Biomasse gasförmig, flüssig und fest (Haushalte und Industrie), Bandbreite von 0,3 bis 7,2 Cent/kWh

Quelle: UBA 2012

71 Stern (2006), S. 143.

72 Anenberg u.a. (2010)

73 Umweltbundesamt (2011) Daten zur Umwelt – Emissionen von Luftschadstoffen im erweiterten EMEP-Gebiet

74 Breitschopf (2012a und 2012b). Die Zahlen sind vorläufig.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND PERSPEKTIVEN

5.1 Erneuerbare Energien - der Schlüssel für eine nachhaltige Stromversorgung

Erneuerbare Energien in der Stromerzeugung leisten einen unverzichtbaren Beitrag zum Klimaschutz und für eine nachhaltige Energieversorgung. Verzögerungen bei der Transformation des Energiesystems gefährden weltweit wirtschaftliche und soziale Entwicklungsmöglichkeiten.

Der fortschreitende Klimawandel gefährdet die Stabilität der globalen Ökosysteme und verursacht hohe ökonomische und soziale Folgekosten. So schätzt die OECD die Kosten einer ungebremsen Erwärmung auf 14 Prozent des weltweiten Konsums bereits bis 2050, mit weiter steigender Tendenz in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts.⁷⁵ Die globalen Kosten von rund ein Prozent des weltweiten Konsums bis 2100, die eine umfassende Begrenzung der THG-Emissionen zur Einhaltung des 2-Grad-Ziels nach vorliegenden Studien⁷⁶ erfordert, sind weitaus geringer.

Wesentliche Kriterien einer nachhaltigen Stromversorgung sind Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit, Risikoarmut und Fehlertoleranz, Ressourcenschonung sowie umfassende Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung externer Kosten.⁷⁷ Die gegenwärtige Stromerzeugung verletzt diese Kriterien: Die Verbrennung konventioneller Energieressourcen führt zu Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen wie Stickoxiden oder Staub, die Atomenergienutzung geht mit hohen Risiken und Folgekosten durch Störfälle⁷⁸ und die Entsorgung der radioaktiven Abfälle einher. Beim Umstieg auf erneuerbare Energien entstehen dagegen wesentlich weniger Treibhausgas- und andere schädliche Emissionen, fossile Ressourcen werden geschont und die Versorgungssicherheit erhöht.

Eine Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien ist nicht nur erforderlich, sondern auch möglich. Die Industrieländer sollten die Transformation der Stromversorgung mit Nachdruck voranbringen und langfristig eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien anstreben.

Die technischen Potentiale für eine Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien sind in allen Ländern vorhanden. Wind- und Sonnenenergie sind dabei von herausragender Bedeutung, sie spielen in allen ambitionierten Ausbauszenarien eine zentrale Rolle.

Zur Einhaltung des 2-Grad-Ziels müssen die Industrieländer ihre Emissionen bis 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 verringern. Da für die Landwirtschaft und einzelne Industrieprozesse auch bei größten Klimaschutzanstrengungen eine Restgröße an Sockelemissionen verbleibt, muss die Stromversorgung langfristig nahezu klimaneutral sein. Eine nachhaltige Stromversorgung erfordert deshalb den Übergang zu einer Vollversorgung mit erneuerbaren Energien.

Die Förderung der erneuerbaren Energien in Industrieländern hat einen erheblichen Anteil daran, dass die Kostenreduktion gerade bei der Photovoltaik sehr viel schneller gelungen ist, als dies vor Jahren noch für möglich gehalten wurde. Daher sollte der Ausbau der erneuerbaren Energien weiter forciert werden. Davon profitieren auch die Schwellen- und Entwicklungsländer.

Auch Schwellen- und Entwicklungsländer sollten im eigenen Interesse verstärkt auf erneuerbare Energien setzen. Dies schafft Chancen für mehr wirtschaftliche Teilhabe und verhindert irreversible Weichenstellungen zu Gunsten einer kohlenstoffintensiven Stromerzeugung.

Die Begrenzung der globalen Erwärmung auf maximal 2 Grad gegenüber der vorindustriellen Zeit ist nur erreichbar, falls sich auch die Schwellen- und Entwicklungsländer an den weltweiten Bemühungen zur Treibhausgasreduzierung beteiligen und deutlich unter dem heute zu erwartenden Emissionstrend zurückbleiben.

75 Vgl. OECD (2012) und Stern (2006).

76 Vgl. Stern (2006) und Edenhofer (2009).

77 Vgl. hierzu Ausführungen in UBA (2009).

78 Lelieveld J. u.a. (2012).

Erneuerbare Energien bieten in abgelegenen ländlichen Räumen die Chance, durch eine dezentrale Stromversorgung Zugang zu Elektrizität und wirtschaftlicher Teilhabe zu schaffen. In vielen Gebieten in Afrika, Indien, Südostasien und Teilen des Mittleren Ostens ist der Betrieb von Photovoltaikanlagen schon heute wirtschaftlich im Vergleich zu einer Versorgung durch Dieselgeneratoren.

In Ländern wie Brasilien, Indien und China wird die Photovoltaik – gemessen an den Strompreisen für Haushaltskunden – schon in Kürze wettbewerbsfähig sein.⁷⁹ Außerdem spielen die Schwellenländer eine immer bedeutsamere Rolle im Wettbewerb auf den stark expandierenden Weltmärkten für Techniken erneuerbarer Energien.

5.2 Wirkungen auf Wettbewerbsfähigkeit, Beschäftigung und wirtschaftliche Entwicklung

Die Kosten erneuerbarer Energien werden in den nächsten Jahren weiter sinken. Da die konventionelle Stromerzeugung zukünftig teurer wird, lohnen sich erneuerbare Energien immer mehr.

Die massiven Kostenreduktionen der vergangenen Jahre bei den Schlüsseltechnologien Wind und Photovoltaik schaffen neue Perspektiven für die Transformation des globalen Energiesystems. Einzelwirtschaftlich sind Techniken erneuerbarer Energien je nach regionaler Voraussetzung teilweise schon heute wirtschaftlich oder nur geringfügig teurer als die fossile Energieerzeugung.

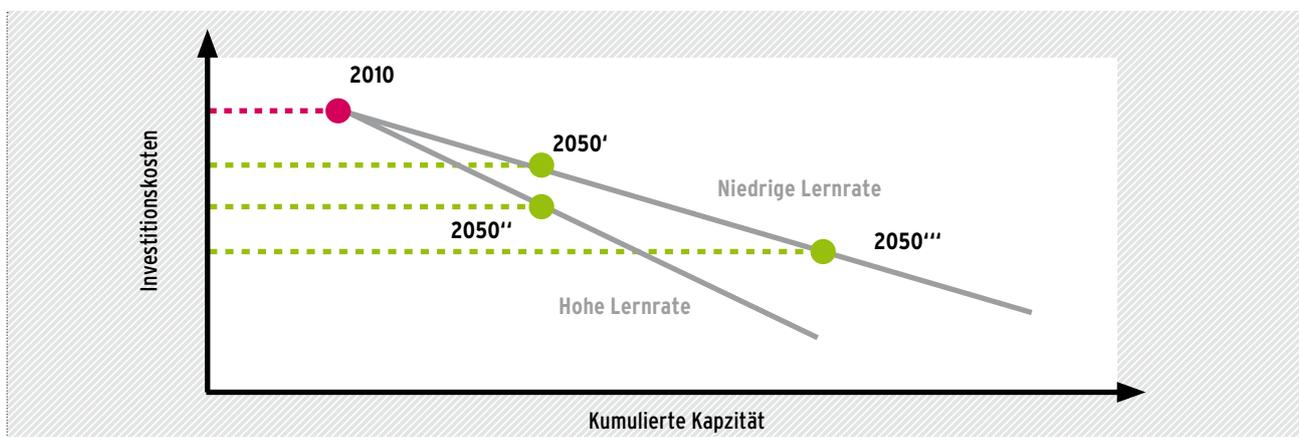
Ein Umbau des Energiesystems hin zu einem Energiemix aus erneuerbaren Energien ist daher bei den zu erwartenden deutlich steigenden Kosten für Brennstoffe aus fossilen Energien und dem anhaltenden technologischen Fortschritt bei den erneuerbaren Energien langfristig auch wirtschaftlich vorteilhaft.

Durch Lernkurveneffekte sinken die Kosten erneuerbarer Energien. Weil alle Länder davon profitieren ist der Ausbau der erneuerbaren Energien eine globale Aufgabe, die überall rasch voran getrieben werden muss.

Die internationale Staatengemeinschaft sollte den technologischen Fortschritt bei den erneuerbaren Energien als Chance begreifen. Je zügiger der globale Ausbau der erneuerbaren Energien voranschreitet, umso eher sind die Früchte einer solchen Strategie in Form sinkender Kosten zu ernten. Das „Abfahren der Lernkurve“ verbessert die Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energien.

Abbildung 20 illustriert diesen Zusammenhang. Bleiben globale Anstrengungen zum Kapazitätsausbau aus, werden die Kosten der erneuerbaren Energien auf relativ hohem Niveau bleiben, abhängig von der Lernrate stellt sich Mitte des Jahrhunderts die Situation 2050' oder 2050'' ein. Bei einem ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien könnte die nachfolgende Generation dagegen selbst bei einer vergleichsweise geringen Lernrate eine 2050'''-Welt erben. Die Möglichkeiten für eine kostengünstige und klimafreundliche Stromversorgung sind damit weitaus besser.

Abbildung 20: Schematische Darstellung des Abfahrens unterschiedlicher Lernkurven



Quelle: PIK (2012)

Studien zeigen, dass sich der Umbau des Energiesystems gesamtwirtschaftlich lohnt. Die Förderung erneuerbarer Energien schafft Arbeitsplätze und steigert die regionale Wertschöpfung. Außerdem verbessert sie die Wettbewerbsfähigkeit auf den dynamisch wachsenden Weltmärkten für Techniken erneuerbarer Energien.

Weltweit arbeiten bereits 5 Millionen Beschäftigte im Bereich erneuerbarer Energien – Tendenz weiter steigend. Studien zeigen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien zu positiven Nettobeschäftigungseffekten führt. Für Deutschland belaufen sich entsprechende Schätzungen auf 143.000 bis 182.000 zusätzlich Beschäftigte im Jahr 2030. In Europa kann der bis 2020 angestrebte Ausbau der erneuerbaren Energien unterm Strich zu 400.000 neuen Arbeitsplätzen führen.

Bis 2025 soll der Weltmarkt für umweltfreundliche Energien weltweit um 747 Milliarden Euro wachsen. Erneuerbare Energien spielen dabei eine zentrale Rolle. Sie sind Schlüsseltechnologien für die Energieversorgung der Zukunft und daher von hoher ökonomischer Relevanz. Länder, die den Ausbau der erneuerbaren Energien vorantreiben, haben Wettbewerbsvorteile auf diesen Märkten.

5.3 Ansätze für einen beschleunigten und kostengünstigen Ausbau der erneuerbaren Energien

Die Vollversorgung mit erneuerbaren Energien in der Stromversorgung ist eine Generationenaufgabe und ein globales Innovationsprojekt. Lokale, regionale, nationale und internationale Akteure sollten den Ausbau der erneuerbaren Energie fördern – Vorreiter demonstrieren dabei die Machbarkeit, sichern sich Zukunftschancen und leisten Überzeugungsarbeit. Forschung und Entwicklung, Innovationsförderung und Instrumente zur Förderung der Marktdiffusion sind wichtig, um den Ausbau der erneuerbaren Energien zu beschleunigen.

Einige Techniken zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stehen noch am Anfang des Technologielebenszyklus. Ihre Wettbewerbsfähigkeit ist noch niedrig und das Investitionsrisiko aufgrund der Unsicherheit der technischen Leistungsfähigkeit hoch. Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsbeihilfen sowie internationale Kooperation helfen Investitionsfinanzierungen zu ermöglichen und innovative Technologien schneller an den Markt zu führen.

Von zentraler Bedeutung für den Ausbau der erneuerbaren Energien sind auch marktbasierende Fördermechanismen wie das in Deutschland eingeführte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Es schafft Planungssicherheit für Investoren, verringert die Finanzierungskosten durch das Senken des Investitionsrisikos und beschleunigt über Learning-by-Doing und Skaleneffekte die technische Entwicklung und die Marktdiffusion.

Kasten 6: Erfolge und Eckpunkte des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)

Das EEG hat sich in Deutschland seit Inkrafttreten im Jahr 2000 als ausgesprochen erfolgreich erwiesen: Der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch erhöhte sich von 6,4 Prozent im Jahr 2000 auf 20,3 Prozent in 2011.⁸⁰ Im internationalen Vergleich ist dieses Ausbautempo beispiellos. Die für den Ausbauerfolg entscheidenden Elemente des EEG sind:

- **Vorrangiger Anlagenanschluss an das Stromnetz:** Netzbetreiber müssen die Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien unverzüglich und vorrangig anschließen, der Verknüpfungspunkt muss technisch und wirtschaftlich geeignet sein.
- **Vorrangige Abnahme und Verteilung des Stroms:** Der EEG-Strom ist seitens der Netzbetreiber vorrangig abzunehmen und bundesweit zu verteilen.
- **Garantierte Einspeisevergütung:** Die Einspeisevergütung ist für 20 Jahre festgelegt, um die Investitionssicherheit zu garantieren. Sie ist für jede Technik differenziert festgelegt und orientiert sich an den Erzeugungskosten. Die Vergütung sinkt kontinuierlich für neu installierte Anlagen, um Kostensenkung durch die technische Entwicklung zu berücksichtigen.

Angesichts des großen Erfolgs des EEG folgten andere Länder diesem Beispiel. Inzwischen gibt es weltweit bereits 65 Länder und 27 Provinzen, die über Einspeisevergütungen den Ausbau der erneuerbaren Energien fördern. Insgesamt sind es weltweit bereits 109 Länder die Einspeisevergütungen oder andere Förderinstrumente für erneuerbare Energien einführt.⁸¹ (REN21, 2012, S. 14).

80 BMU (2012a), S. 7.

81 REN21 (2012), S. 14.

Wettbewerbsverzerrungen zu Lasten der erneuerbaren Energien sind abzubauen. Dies erfordert den Abbau klimaschädlicher Subventionen und die Internalisierung externer Kosten in der Stromerzeugung. Die Marktdurchdringung erneuerbarer Energien ließe sich dadurch erheblich beschleunigen. Zugleich würde der Förderbedarf für die erneuerbaren Energien stark zurückgehen.

Die Subventionierung fossiler Energieträger und der Atomenergie verringert die Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energien. Eine Abschaffung dieser Subventionen fördert daher ihre schnellere Verbreitung. Deshalb sollen alle Staaten Subventionen für fossile Energieträger stufenweise abbauen. Entsprechende Ansätze bestehen bereits und sollten zügig umgesetzt werden.⁸²

Die Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energien wird zusätzlich durch die mangelnde Internalisierung der externen Umweltkosten bei der Stromversorgung behindert. Klimafolgeschäden und weitere Schäden an Umwelt und Gesundheit sind bei der fossilen Stromerzeugung und Atomkraft um ein Vielfaches höher als bei erneuerbaren Energien. Der Emissionshandel und andere Instrumente zur Internalisierung externer Umweltkosten sind deshalb einzuführen und auszubauen, um die Nutzung erneuerbarer Energien weltweit voranzutreiben.

Parallel zum Ausbau der erneuerbaren Energien ist ihre Integration in das System der Stromversorgung zu fördern. Dies erfordert den Ausbau der Netze, Lastmanagement und Speicher.

Für einen erfolgreichen Umbau des Stromsystems hin zu einer Vollversorgung durch erneuerbare Energien ist ein – mit den steigenden Anforderungen durch fluktuierende Energien schritthaltender – Ausbau der Stromübertragungs- und Verteilernetze erforderlich.

Wie sich derzeit in Deutschland bei der Energiewende zeigt, müssen dabei viele Akteure Hand in Hand arbeiten. Die Politik muss dafür die richtigen Rahmenbedingungen schaffen, mögliche Netzengpässe frühzeitig erkennen, die notwendigen Planungsprozesse anstoßen und die Netze rechtzeitig ertüchtigen oder ausbauen. Die Erstellung jährlicher Netzentwicklungspläne kann in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag leisten.

Neben dem Ausbau der Stromnetze ist ein verstärktes Lastmanagement zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage erforderlich. Heute schon verfügbare Flexibilitätspotentiale sind zu aktivieren und in die Strommärkte einzubeziehen. Zudem ist die Erforschung und Erprobung von Speichertechniken eine wichtige Voraussetzung für die Integration der dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien in das Stromversorgungssystem.

5.4 Fazit

Die Staaten der Welt haben sich auf der Weltklimakonferenz 2010 darauf geeinigt, dass die Durchschnittstemperatur bis zum Ende des Jahrhunderts um nicht mehr als zwei Grad steigen soll. Ein wesentlicher Schritt dafür ist ein Systemwechsel der Stromversorgung. Neben einer drastischen Verbesserung der Energieeffizienz ist der Ausbau der erneuerbaren Energien die zweite Säule einer klimaschonenden Stromversorgung. Die technischen Potentiale für einen Ausbau sind vorhanden. Die Kostenentwicklung der letzten Jahre zeigt, dass dieser zum Teil schon heute wirtschaftlich oder nur mit geringen Mehrkosten verbunden ist. Jeder Staat kann durch geeignete Instrumente den Ausbau der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung in Richtung einer Vollversorgung vorantreiben. International koordinierte Anstrengungen für einen globalen Umbau der Stromversorgung würden die ohnehin schon starke Kostendegression vieler erneuerbarer Energien weiter beschleunigen – dies käme allen Ländern zu Gute.

⁸² So fordert das Kyoto-Protokoll explizit die Abschaffung von Subventionen, die die Reduktion von Treibhausgasen behindern (UNFCCC (2007), Artikel 2, Abschnitt 1, a) v)). Im Rahmen der G20-Beschlüsse in Pittsburgh im September 2009 verpflichteten sich die Regierungschefs, Subventionen für fossile Energieträger, die den verschwenderischen Verbrauch fördern, mittelfristig auslaufen zu lassen (G20 Leaders, 2009).

6 LITERATURVERZEICHNIS

Anenberg S.C., Horowitz, L.W., Tong, D.Q. und West, J.J. (2010), An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environmental Health Perspectives* 118(9), 1189–1195

BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.) (2012): Umfrage Juni 2012 – Fokus Energiewende: Das Meinungsbild der Bevölkerung, www.bdew.de

Bloomberg (2012), Bazilian M., Onyejia I., Liebreich M., MacGill I., Chase J., Shah J., Gielen D., Arent D., Landfear D. und Zhengrong S. , Re-considering the Economics of Photovoltaic Power. <http://www.newenergyfinance.com/free-publications/white-papers/>

BMU (2012a), Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung. http://www.erneuerbare-energien.de/erneuerbare_energien/datenservice/ee_in_zahlen/doc/2720.php

BMU (2012b), GreenTech. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland made in Germany 3.0, Environmental Technology Atlas for Germany

BMU/UBA (2011), Umweltwirtschaftsbericht 2011, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4210.pdf>

Breitschopf B. (2012a), How can costs and benefits of RE deployment be measured? – Methods and results, Präsentation bei der “Sustainable Energy Week 16-20 June 2012, Brüssel, http://isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/x/de/veranstaltungen/EUSEW_KNEE_final-presentation.pdf

Breitschopf B. (2012b), Future costs and benefits – the main drivers, Präsentation bei der “Sustainable Energy Week 16-20 June 2012, Brüssel, http://isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/x/de/veranstaltungen/EUSEW_KNEE_final-presentation.pdf

Breitschopf B., Klobasa M., Sensfuß F., Steinbach J., Ragwitz M., Lehr U., Horst J., Hauser E., Leprich U., Diekmann J. Braun F., Horn M. (2011), Einzel- und gesamtwirtschaftliche Analyse von Kosten- und Nutzenwirkungen des Ausbaus Erneuerbarer Energien im deutschen Strom- und Wärmemarkt. Update der quantifizierten Kosten- und Nutzenwirkungen für 2010, http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/knee_update_2011_bf.pdf

DLR/IWES/IFNE (2010), J., Pregger T., Scholz Y., Naegler T., Sterner M., Gerhardt N., von Oehsen A., Pape C., Saint-Drenan Y., Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Im Auftrag des BMU. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf

DLR/IWES/IFNE (2011), Nitsch J., Pregger T., Scholz Y., Naegler T., Heide D., Tena D., Trieb F., Scholz Y., Nienhaus K., Gerhardt N., Sterner M., Trist T., von Oehsen A., Schwinn R., Pape C., Hahn H., Wickert M., Wenzel B., DLR/IWES/IFNE, Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. LSZ 2011, Im Auftrag des BMU. http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2011_bf.pdf

EC (European Commission) (2011), Impact Assessment Accompanying the Energy Roadmap 2050. SEC(2011) 1565. http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/sec_2011_1565_part2.pdf

ECF (European Climate Foundation) (2010), Roadmap 2050. A Practical Guide To A Prosperous, Low-Carbon Europe. http://roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1_fullreport_PressPack.pdf

- Edenhofer O., Carraro C., Hourcade J., Neuhoﬀ K. (2009), The Economics of Decarbonization – Report of the RECIPE, Project. Potsdam Institute for Climate Impact Research. <http://www.pik-potsdam.de/research/sustainable-solutions/research/ClimatePolicies/recipe-groupspace/working-papers/recipe-synthesis-report>
- Energy Watch Group (2008), Peter S., Lehmann H., Renewable Energy Outlook 2030. Energy Watch Group Global Renewable Energy Scenarios. http://www.energywatchgroup.org/fileadmin/global/pdf/2008-11-07_EWG_REO_2030_E.pdf
- EPIA (European Photovoltaic Industry Association) (2012), Global market outlook for photovoltaics until 2016, <http://files.epia.org/files/Global-Market-Outlook-2016.pdf>
- EREC (European Renewable Energy Council) (2010), Rethinking 2050: A 100 % renewable energy vision for the European Union. http://www.rethinking2050.eu/fileadmin/documents/ReThinking2050_full_version_final.pdf
- EWI/Energynautics (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln) (2011), Roadmap 2050 - a closer look. http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Politik_und_Gesellschaft/2011/Roadmap_2050_komplett_Endbericht_Web.pdf
- EWI/GWS/Prognos (Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung) (2010), Schlesinger M., Lindenberger D. Lutz C., Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, Berlin: BMWi. <http://www.bmu.de/energiewende/downloads/doc/46367.php>
- FH ISE (2012), Kost C., Schlegl T., Thomsen J., Nold S., Mayer J., Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien. http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf/at_download/file
- G20 Leaders (2009): Leaders' Statement – The Pittsburgh Summit 2009, <http://g20mexico.org/images/stories/canalfinan/docs/uk/02pittsburgh.pdf>
- Greenpeace/Eutech Energie und Management (2009), Achner S., Barzantny K., Vomberg S., Groscurth H., Böhling A., Breue T., Klimaschutz: Plan B 2050. Energiekonzept für Deutschland. http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/Plan_B_2050_lang.pdf
- Greenpeace/EREC (2010), Teske S., Energy [R]evolution. A sustainable world energy outlook. <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/Energy-Revolution-A-Sustainable-World-Energy-Outlook/>
- Greenpeace/EREC/GWEC (Global Wind energy Council) (2012), Teske S., Energy [R]evolution 2012. A sustainable world energy outlook. <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/Campaign-reports/Climate-Reports/Energy-Revolution-2012/>
- IEA (International Energy Agency) (2010a), Energy technology perspectives 2010: Scenarios & strategies to 2050, Paris: OECD/IEA. http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2100
- IEA (2010b), Projected Costs of Generating Electricity. http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2207
- IEA (2011a) Deploying Renewables 2011. <http://www.iea.org/w/bookshop/add.aspx?id=414>
- IEA (2011b), World Energy Outlook 2011, <http://www.iea.org/weo/>

- PWC/PIK/IIASA/ECF (PricewaterhouseCoopers LLP, International Institute for Applied System Analysis) (2010), 100% renewable electricity. A roadmap to 2050 for Europe and North Africa, http://www.pwc.co.uk/en_UK/uk/assets/pdf/100-percent-renewable-electricity.pdf
- Ragwitz M., Schade W., Breitschopf B., Walz R., Helfrich N., Rathmann M., Resch G., Panzer C., Faber T., Haas R., Nathani C., Holzhey M., Konstantnaviciute I., Zagamé P., Fougeyrollas A., Le Hir B., (2009), EmployRES. The impact of renewable energy policy on economic growth and employment in the European Union, http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/renewables/2009_employ_res_report.pdf
- REN 21 (2011), Renewables 2011 Global Status Report, <http://www.ren21.net>
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2011), Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten Januar 2011, Berlin. http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_07_SG_Wege_zur_100_Prozent_erneuerbaren_Stromversorgung.pdf;jsessionid=2E56D7ABF828F37413638348E5F12D2E.1_cid135?__blob=publicationFile
- Stern (2006), Stern Review 2006, <http://en.scientificcommons.org/51856700>
- Timilsina G., Kurdgelashvili L., Narbel P., (2012), Solar energy: Markets, economics and policies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 449–465
- UBA (Umweltbundesamt) (2009), Klimaschutz und Versorgungssicherheit. Reihe „Climate Change“ Nr. 13/2009. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/dateien/3850.html>
- UBA (2010b), Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen, www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3997.pdf
- UBA (2010c), Umweltschädliche Subventionen in Deutschland, aktualisierte Ausgabe 2010, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3780.pdf>
- UBA (2011), Daten zur Umwelt – Emissionen von Luftschadstoffen im erweiterten EMEP-Gebiet, abgerufen am 10.07.2012, <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-Umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=3589>
- UBA (2012), Ökonomische Bewertung von Umweltschäden – Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten, im Erscheinen
- ÜNB (Übertragungsnetzbetreiber) (2012), Netzentwicklungsplan Strom 2012, Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber <http://www.netzentwicklungsplan.de/>
- UNFCCC (Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen) (2007): Das Protokoll von Kyoto, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpger.pdf>
- UNEP/Frankfurt School/BNEF, (United Nations Environment Programme /Frankfurt School/Bloomberg New Energy Finance), McCrone A., Usher E., Sonntag-Brian, V., Moslener U., Grüning C.,(2012) Global Trends in Renewable Energy Investment, Frankfurt, <http://fs-unep-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-2012>
- WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2011): Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation, Hauptgutachten, http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2011/wbgu_jg2011.pdf
- Wheeler D. und Ummel K. (2008), Global Estimation of CO2 Emissions from the Power Sector, http://kms1.isn.ethz.ch/serviceengine/Files/ISN/55885/ipublicationdocument_singledocument/8c7040ae-8f44-4579-948f-363fd88eefdc/en/file_Calculating_CARMA_FINAL.pdf

WI/PIK (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH) (2010), Lechtenböhrer S., Durand A., Luhmann J., Samadi S., Schneider C., Knopf B., Schmid E., Kosten- und Modellvergleich langfristiger Klimaschutzpfade (bis 2050). Zwischenbericht 02 zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 3708 49 104, Potsdam, http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kosten_und_modellvergleich_langfristiger_klimaschutzpfade.pdf

WWF/Ecofys/Oma (Office of Metropolitan Architecture) (2011), Jeffries B., Deng Y., Cornelissen S., Klaus S., The Energy Report - 100% Renewable Energy By 2050, http://assets.panda.org/downloads/the_energy_report_lowres_111110.pdf

Yang, C.-J., (2010), Reconsidering solar grid parity. Energy Policy 38, 3270–3273, <http://www.duke.edu/~cy42/>